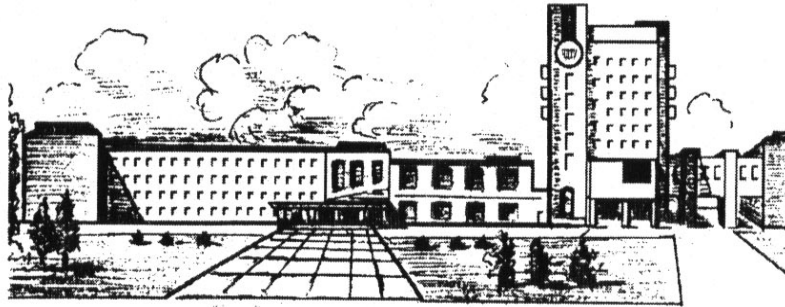


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(36)

Чернігів 2024

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 7 від 01.07.2024 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – № 2(36). – 344 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

Головний редактор:

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».

Заступник головного редактора:

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Члени редакційної колегії:Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дмитрієв Д. О., доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;

Новомлинець О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.

Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;

Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;

Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Michał Bemberek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).

Інформаційно-комп'ютерні технології

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;

Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний торговельно-економічний університет;

Мелешко С. В., доктор технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет;

Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет;

Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Цюцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва та архітектури.

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вініков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);

Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;

Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);

Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Пристапа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);

Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Хімічні та харчові технології

Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;

Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Гуменюк О. Л., кандидат хімічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дударєв І. М., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Плаван В. П., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;

Трус І. М., кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Будівництво та геодезія

Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва та архітектури;

Крячок С. Д., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури;

Паляниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;

Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва та архітектури;

Терещук О. І., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

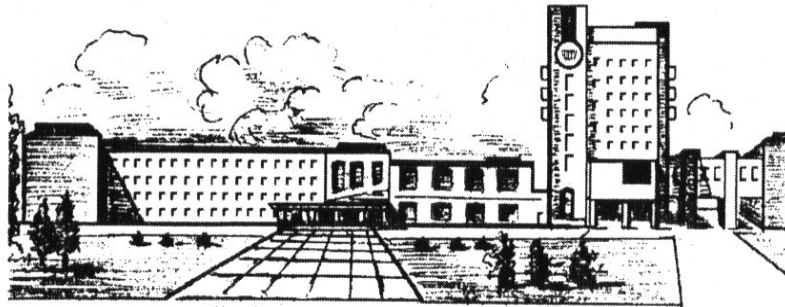
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва та архітектури;

Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури.



ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY**



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

ISSUE № 2(36)

Chernihiv 2024

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 7 dated 01.07.2024). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2024. – № 2(36). – 344 p.

This journal contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, electric power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Deputy Editor in chief:

Sapon S.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.

Members of the Editorial Board:

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Dmytriiiv D.O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson National Technical University;

Yeroshenko A.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Markov O.Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia;

Novomlynets O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Pilipenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique;

Povstianoi O.Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical University;

Sira N.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University);

Fedorynenko D.Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor, Tohoku University, Japan;

Yushchenko S.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University);

Michał Bemberek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).

Information and computer technologies

Azarov O.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;

Dorosh M.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University);

Yeremenko V.S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Zaitsev S.V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Kryvoruchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Trade and Economics;

Meleshko Ye.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University;

Pavlenko P.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aviation University;

Semenov S.H., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»;

Tsiutsiura S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture.

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;

Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;

Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;

Husev O.O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Prystupa A.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Stepenko S.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Chemical and food technologies

Antoniuk I.Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State University of Trade and Economics;

Buialska N.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Gumeniuk O.L., PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Dudarev I.M., Doctor of Technical Science, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Zvirko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;

Plavan V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design;

Samokhvalova O.V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;

Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;

Trus I. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Tsybulia S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Cheliabiiieva V.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Construction and geodesy

Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Mykhailovskiy D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Paliyansya B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;

Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Shults R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Tereshchuk O.I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University

Yurchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Kyiv National University of Construction and Architecture.

© Chernihiv Polytechnic National University, 2024



ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Заставський К. О., Налімов Ю. С.</i> Дослідження сил опору з боку магнітно-абразивного інструменту при обробленні тонких деталей типу лопатка ГТД	9
<i>Bolotov M., Bolotov N., Prybytko I., Korzachenko M.</i> Sustainable practices of concrete manufacturing	15
<i>Каранда В. Г., Єрошенко А. М., Кальченко Д. В.</i> Часові зв'язки технологічних процесів деревообробних та меблевих підприємств	31
<i>Сабол С. Ф., Холявік О. В., Бородій Ю. П., Проценко П. Ю., Піманов В. В., Компанієць Г. Р.</i> Вплив тиску рідини на технологічну пластичність металу при прямому гідромеханічному видавлюванні осесиметричних виробів	37
<i>Бородій Ю. П., Садовський О. А., Холявік О. В., Сабол С. Ф., Проценко П. Ю., Піманов В. В.</i> Розробка спеціалізованого обладнання для виготовлення деталей листовим штампуванням	50
<i>Петров О. Д., Корбут Є. В.</i> Перспективи застосування свердел із дискретно модифікованими робочими поверхнями для забезпечення якості отворів у деталях із волокнистих полімерних композиційних матеріалів	59
<i>Пірогов Д. О., Воронцов Б. С.</i> Аналіз впливу швидкості різання на температуру й сили різання при точінні заготовок із титанового сплаву ТІ-6AL-4V	65
<i>Набережна О. О., Губарєв С. В.</i> Вплив вмісту графіту на експлуатаційні характеристики графітопластів на основі фенілону	74
<i>Романенко В. В., Казляк О. Д., Блощицин М. С., Романенко М. В., Євсюкова Є. В.</i> Розробка способу газолазерної різки металів із подальшим вигладуванням поверхні різів	80
<i>Гапонова О. П., Тарельник Н. В.</i> Оцінка жаростійкості алюмінієвих покриттів на сталях, отриманих методом електроіскрового легування	92

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Казимир В. В., Роговенко А. І., Карась О.</i> Проектування системи керування дрона у складі захисної мультиагентної системи	102
<i>Козолун П. Д., Любчак В. О.</i> Функціональна модель та алгоритм розробки інформаційного сервісу для обліку й закупівлі товарів	116
<i>Рзаєва С. Л., Чернишова Д. Д.</i> Інформаційно-аналітична система для гендерно-нейтрального відбору кадрів закладу вищої освіти	126
<i>Іскрижицький А. М., Задорожній А. О.</i> Дослідження наявних методів та технологій для децентралізованого зберігання та адміністрування публічних даних	137
<i>Зетченко В. С., Задорожній А. О.</i> Оптимізація маршруту громадського транспорту за допомогою алгоритму A*	151
<i>Болотов Г. П., Приступа А. Л., Степенко С. А., Пархоμεць В. Р.</i> Обґрунтування типу мультикоптерного дрону для використання у складі мультиагентних систем	162
<i>Пархоменко Б. М., Акименко А. М.</i> Використання інформаційних моделей для прогнозування поведінки фінансових показників	173

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Pliasovska A., Ushchapovskiy D., Linyucheva O., Vorobyova V., Motronyuk T., Vasyliiev G.</i> Current mode of electrochemical 3D printing of copper parts	181
<i>Антонюк І. Ю., Медведєва А. О.</i> Технологія безглютенового тістечка з підвищеним вмістом йоду	194
<i>Фандєєв О. В., Полоз О. Ю.</i> Оптимізація температурно-часових режимів пост-отвердження зносостійких епоксидних композицій	204

<i>Zaitsev S., Kishnevsky V., Tikhenko V.</i> Control of dissolved gas content in fresh and oxidised turbine oils.....	215
--	-----

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Лось А. М., Велигорський О. А.</i> Методика вибору технології акумуляторних батарей для автономних систем спостереження на базі безпілотних літальних апаратів.....	227
<i>Кириленко Я. О., Кутовий Ю. М.</i> До питання методів побудови систем захисту від надлишкового ковзання коліс рейкових транс-портних засобів	242

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Смілка В. А.</i> Застосування триангуляції Делоне для аналізу пішохідної доступності до закладів освіти	251
<i>Zatserkovny V., Vorok V.</i> ERS technologies in precision farming	266
<i>Прокопенко О. С., Зацерковний В. І.</i> Оцінка запасів анадольського родовища рідкісноземельних руд на основі каркасного моделювання	278
<i>Гой В. В., Халіков С. А., В'яткін Р. С., Бурвіков І. Ю.</i> Просторові чинники геопросторового розвитку територіальних громад	284
<i>Багін М. Л.</i> Науково обґрунтовані рекомендації забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів	290
<i>Левщанов С. В.</i> Застосування безпілотних літальних апаратів у будівельній індустрії.....	297
<i>Гера О. В., Олесків Р. Є., Дорош Л. І., Гринішак М. Я., Михайлишин В. П.</i> Особливості розроблення проєкту спостережень за осіданнями фундаменту багатоповерхової будівлі	303
<i>Петраковська О. С., Михальова М. Ю.</i> Вихідні дані при розробленні містобудівної документації місцевого рівня	312
<i>Тадєєв О. А.</i> Моделювання горизонтальних деформацій земної поверхні регіонального масштабу з використанням GNSS-даних (на прикладі території Європи)	319
<i>Cristian Alfredo Wittig Grell, Zavatskyi S., Savchenko O.</i> Center for the creation and development of start-ups of the Chernihiv Polytechnic National University: architectural renovation of the building of the former cinema “Peremoha” in Chernihiv	331
ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ	343

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING

<i>Maiboroda V., Dzhulii D., Zastavskiy K., Nalimov Yu.</i> Research of drag forces on the part of the magneto-abrasive tool during the finishing of thin parts such as the blade of a gas turbine engine.....	9
<i>Bolotov M., Bolotov H., Prybytko I., Korzachenko M.</i> Sustainable practices of concrete manufacturing.....	15
<i>Karanda V., Yeroshenko A., Kalchenko D.</i> Temporal relationships of technological processes of woodworking and furniture enterprises	31
<i>Sabol S., Kholiavik O., Borodii Yu., Protsenko P., Pimanov V., Kompaniiets H.</i> Influence of liquid pressure on the technological plasticity of metal under direct hydromechanical extrusion of visesimetric products.....	37
<i>Borodii Yu., Sadovskiy O., Kholiavik O., Sabol S., Protsenko P., Pimanov V.</i> Development of specialized equipment for manufacturing parts by the sheet stamping method.....	50
<i>Petrov O., Korbut I.</i> Prospects for the application of drills with discretely modified working surfaces to ensure the quality of holes in parts made of fiber polymer composite materials	59
<i>Pirohov D., Vorontsov B.</i> Investigation the influence of cutting speed on cutting forces and temperature in turning of titanium alloy TI-6AL-4V	65
<i>Naberezhna O., Hubarev S.</i> The influence of graphite content on the performance characteristics of graphite plastics based on phenylon.....	74
<i>Romanenko V., Kaglyak O., Bloschchysyn M., Romanenko M., Yevsiukova Ye.</i> Development of a method for gas laser cutting of metals with subsequent finishing of cut surfaces	80
<i>Haponova O., Tarelnik N.</i> Evaluation of the heat resistance of aluminum coatings on steels produced by electrospark alloying	92

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Kazymyr V., Rohovenko A., Karas O.</i> Designing a drone control system as part of a defensive multi-agent system	102
<i>Kozolup P., Volodymyr L.</i> Functional model and algorithm for the development of an inventory and procurement information service.....	116
<i>Rzaieva S., Chernyshova D.</i> Information and analytical system for gender-neutral selection of personnel in higher education institutions.....	126
<i>Iskryzhyskii A., Zadorozhnyi A.</i> Study of available methods and technologies for decentralized storing and administration of public data	137
<i>Zetchenko V., Zadorozhnyi A.</i> Public transport route optimization using the A* algorithm	151
<i>Bolotov G., Prystupa A., Stepenko S., Parkhomets V.</i> Justification of technical characteristics of objects of multiagent systems based on multicopter drones	162
<i>Parkhomenko B., Akimenko A.</i> Use of information models to predict the behavior of financial indicators	173

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Pliasovska A., Ushchapovskiy D., Linyucheva O., Vorobyova V., Motronyuk T., Vasyliiev G.</i> Current mode of electrochemical 3D printing of copper parts.....	181
<i>Antonyuk I., Medvedieva A.</i> Technology of gluten-free cake with increased iodine content.....	194
<i>Fandeev O., Poloz O.</i> Optimization of temperature-time conditions of post-curing of wear-resistant epoxy compositions	204
<i>Zaitsev S., Kishnevsky V., Tikhenko V.</i> Control of dissolved gas content in fresh and oxidised turbine oils.....	215

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>Los A., Veligorskyi O.</i> Methodology of selecting battery technology for autonomous surveillance systems based on UAVS.....	227
<i>Kyrylenko Ya., Kutovyi Yu.</i> On the question of methods of building protection systems against excessive slipping of wheels of rail vehicle.....	242

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

<i>Smilka V.</i> Application of delone triangulation for the analysis of pedestrian accessibility to educational institutions.....	251
<i>Zatserkovny V., Vorok V.</i> ERS technologies in precision farming	266
<i>Prokopenko O., Zatserkovnyi V.</i> Reserves calculation of the anadol rare earth ore deposit based on wireframe modeling.....	278
<i>Goi V., Khalikov S., Viatkin R., Burvikov I.</i> Spatial factors of geospatial development of territorial communities.....	284
<i>Bahin M.</i> Scientificly based recommendations for ensuring the investment attractiveness of regional lands.....	290
<i>Levshchanov S.</i> Application of unmanned aerial vehicles in the construction industry	297
<i>Gera O., Oleskiv R., Dorosh L., Hrynishak M., Mykhailyshyn V.</i> Peculiarities of developing the project of observations over subsidence of the foundation in a multi-storied building.....	303
<i>Petrakovska O., Mykhalova M.</i> Output data in the development of urban planning documentation at the local level.....	312
<i>Tadyeyev O.</i> Modeling of horizontal deformations of the earth's surface on a regional scale using gnss data (on the example of the territory of Europe)	319
<i>Cristian Alfredo Wittig Grell, Zavatskyi S., Savchenko O.</i> Center for the creation and development of start-ups of the Chernihiv Polytechnic National University: architectural renovation of the building of the former cinema “ Peremoha ” in Chernihiv	331
BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES.....	343

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-9-14

УДК 621.923

**Віктор Станіславович Майборода¹, Дмитро Юрійович Джулій²,
Костянтин Олегович Заставський³, Юрій Степанович Налімов⁴**

¹доктор технічних наук, професор кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)
E-mail: maiborodavs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>. SCOPUS Author ID: 7004207035

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)
E-mail: dmytro.dzhulii@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>. SCOPUS Author ID: 57217587956

³аспірант кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)
E-mail: zastavskiy96@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-369X>

⁴кандидат технічних, старший науковий співробітник
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка (Київ, Україна)
E-mail: Nalimov@nas.gov.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ ОПОРУ З БОКУ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ЛОПАТКА ГТД

У проведеній роботі досліджено сили лобового опору, що виникають під час магнітно-абразивного оброблення тонких лопаток газотурбінного двигуна. Досліджено вплив технологічних параметрів процесу, зокрема швидкості руху лопаток вздовж робочої зони та величини магнітної індукції, на сили опору з боку магнітно-абразивного інструменту на оброблювані поверхні. Встановлено, що зростання швидкості сприяє зниженню відсоткової різниці між максимальними та мінімальними значеннями сил опору, а при малих міделевих перетинах деталей призводить також до руйнування і «зриву» веретеноподібних формувань у магнітно-абразивному інструменті.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення; швидкість оброблення; магнітна індукція; сили опору; міделевий перетин.

Рис.: 3. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Магнітно-абразивний інструмент (МАІ) – це інструмент, що формується з магнітно-абразивного порошку в процесі магнітно-абразивного оброблення (МАО) [1], а його властивості залежать від низки факторів різного походження (типу та розміру частинок магнітно-абразивного порошку, величини магнітної індукції, конструкції магнітної системи, кінематики та динаміки процесу і т. ін.). Процес МАО у великих магнітних зазорах здебільшого застосовується при фінішному обробленні виробів складної форми, таких як різальний інструмент, лопатки газотурбінних двигунів (ГТД) і т. ін. Багатофакторність умов формування МАІ у великих магнітних зазорах створює певні ускладнення при дослідженнях його властивостей, а відсутність відповідної інформації є перешкодою для ефективного використання методу у виробничих умовах унаслідок недостатності інформації про реальні сили, процеси та явища, що мають місце під час оброблення. Це безпосередньо впливає на можливість формування ефективного МАІ та є критичною проблемою у розрахунку верстатів для проведення оброблення через неможливість коректної постановки технічного завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1; 2] показано, що ефективне МАО лопаток ГТД на верстаті з кільцевою робочою зоною з великими магнітними зазорами та, як наслідок, опір руху деталі з боку МАІ безпосередньо залежить від швидкості оброблення. Встановлено, що при малих швидкостях оброблення перед оброблюваною лопаткою рухається маса порошку у вигляді квазістабільних веретеноподібних формувань, тобто часточки порошку утворюють ущільнений, малорухомий об'єм із порошку, який

практично не рухається відносно оброблюваних поверхонь, особливо в зоні атакуючої кромки, що зумовлює мінімальне видалення матеріалу деталі з кромки й поверхонь лопатки біля кромки. При цьому ущільнена зона в МАІ перешкоджає руху деталі в робочому зазорі, тобто відбувається збільшення сил опору. Натомість оброблення при високих швидкостях характеризується розривом веретеноподібних формувань перед деталлю та, як наслідок, активною взаємодією частинок МАІ з усіма оброблюваними поверхнями [1-3]. Саме зазначене явище дозволило розробити технологічні засади для розмірного формування вхідних і вихідних кромок лопаток компресорів ГТД. Проте отримані попередні результати суперечать даним отриманим у дослідженнях, наведених у [4; 5]. Тому доцільним є проведення детальнішого аналізу впливу швидкості оброблення на силу опору при МАО з використанням як зразку лопатки компресора газотурбінного двигуна.

Метою роботи є дослідження сил лобового опору, який виникає в процесі МАО при взаємодії магнітно-абразивного інструменту з лопаткою ГТД залежно від технологічних параметрів процесу.

Для визначення нормальних сил при МАО тонкої деталі було використано методику дослідження нормальної складової сил, що діють на деталь з боку МАІ наведену в [5]. Зразками, що використовували в експерименті були лопатки компресора ГТД товщиною 1 мм, висотою 35 мм. Зразки виготовлені зі сплаву титана ВТ-8. Швидкість руху лопаток в робочій зоні варіювалась в діапазоні 1–3,5 м/с, а індукція магнітного поля в межах 0,2–0,25 Тл.

На рис. 1 наведено гістограми залежності сил опору з боку МАІ від величини швидкості та магнітної індукції при обробленні тонкої деталі.

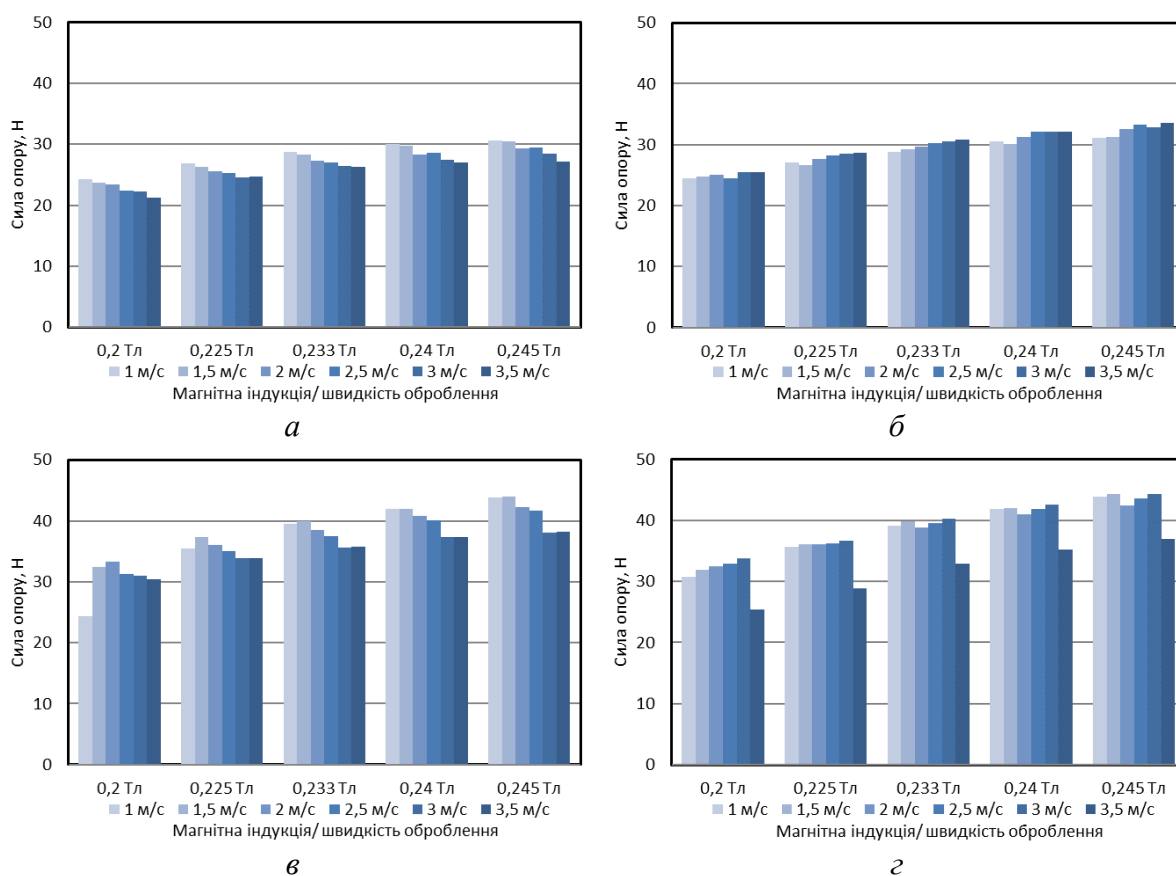


Рис. 1. Залежність значень сил опору з боку МАІ від величини магнітної індукції та швидкості оброблення при МАО лопатки ГТД порошками Полімам-Т 200/100 мкм (а), 400/315 мкм (в) та Полімам-М 200/100 мкм (б), 400/315 мкм (г)

Визначено, що оброблення тонкої деталі порошками з зернистістю 200/100 мкм (рис. 1, *a, б*) не має явного впливу швидкості оброблення на сили опору, вплив величини магнітної індукції залишається суттєвим, хоч і меншим ніж при обробленні циліндричних і призматичних деталей з характерними розмірами 8-16 мм [6]. Встановлено, що значення сили опору при MAO тонкої деталі суттєво менші ніж при обробленні більших деталей [6; 7], що пояснюється виходячи з величини міделевого перетину досліджуваних деталей. Зазначимо, що при обробленні лопаток ГТД порошками з зернистістю 400/315 мкм (рис. 1, *в, г*) має місце зміна умов взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями, особливо при підвищених швидкостях руху деталей вздовж кільцевої ванни і, як наслідок, інший характер процесу оброблення. Визначено, що при швидкостях оброблення 3–3,5 м/с присутнє різке зниження сил опору (на 10–25 %). Це підтверджує явища, описані в роботах [1-3], пов'язані з умовами утворення і руйнування веретеноподібних структурних елементів в складі МАІ, які безпосередньо контактують з оброблюваною лопаткою.

Для кращого пояснення явища розриву веретеноподібних утворень в МАІ необхідно розглянути поведінку порошку в зоні перед деталлю. Схематично поведінка частинок магнітно-абразивного порошку (МАП) показана на рис. 2. Дрібні зерна МАП фракції 200/100 мкм при невеликих швидкостях переміщення деталей (до 3 м/с) через суттєву різницю в розмірах частинок і представницьких об'ємів, які формуються в МАІ утворюють перед вхідною кромкою лопатки ущільнену квазістабільну зону (рис. 2, *a*). Ущільнена зона, затримуючись на вхідній кромці, рухається в МАІ разом з лопаткою і перешкоджає вільному обтіканню поверхні оброблюваної деталі. Відзначимо, що додатково в ущільненій зоні має місце збільшення магнітних сил, що з'єднують часточки порошку між собою. У результаті руху лопатки разом з зазначеною зоною має місце зростання сил опору з боку МАІ внаслідок зростання величини міделевого перетину, який визначається розмірами ущільненої зони. Такі ущільнені зони запобігають розриву веретеноподібних формувань порошку, границі яких показані штриховими лініями, та утримують стабільно високі значення сили опору. Натомість частки порошку зернистістю 400/315 мкм (рис. 2, *б*) не схильні до затримки значної маси порошку на торці оброблюваної деталі, через відносно великий розмір зерен у порівнянні з вхідною кромкою деталі. Такий характер розміщення зерен сприяє явищу розриву веретеноподібних утворень порошку при високих швидкостях оброблення, та, як наслідок, сприяє різкому падінню сил опору зі сторони МАІ. Це фактично підтверджує, наведений у роботах [1-3], ефект руйнування веретеноподібних утворень з порошку, які формуються в середній частині зазору перед деталлю при високих швидкостях оброблення. Варто також зазначити, що найбільш активно це явище спостерігається при MAO з використанням порошку Полімам-М (рис. 1, *г*). Це може бути пов'язано з округлою формою зерен такого порошку, що зумовлює менші сили заклинювання між часточками порошку у порівнянні зі скалчастим, що своєю чергою сприяє активному руйнуванню веретеноподібних ущільнених утворень у структурі МАІ, зриву частинок порошку з лобової поверхні – кромки лопатки шляхом роз'єднання частинок і структурних утворень в порошок між собою.

Проаналізована різниця між мінімальними та максимальними значеннями величин сили опору зафіксованих обладнанням протягом певного часу MAO. Визначено (рис. 3), що коливання між максимальними та мінімальними значеннями сил лобового опору суттєво знижуються зі зростанням швидкості оброблення, тобто відбувається стабілізація процесу MAO – має місце рівномірне «обтікання» формуваннями МАІ оброблюваної поверхні. Відсоткове значення в різниці максимальних та мінімальних значень відносно середнього значення сили опору при малих швидкостях оброблення сягало 45 %, при високих – не більше 10 %.



Рис. 2. Схематичне представлення взаємодії веретеноподібних формувань у МАІ сформованого з дрібнозернистих (а) та крупнозернистих (б) порошків при МАО тонкої деталі типу лопатка компресора ГТД

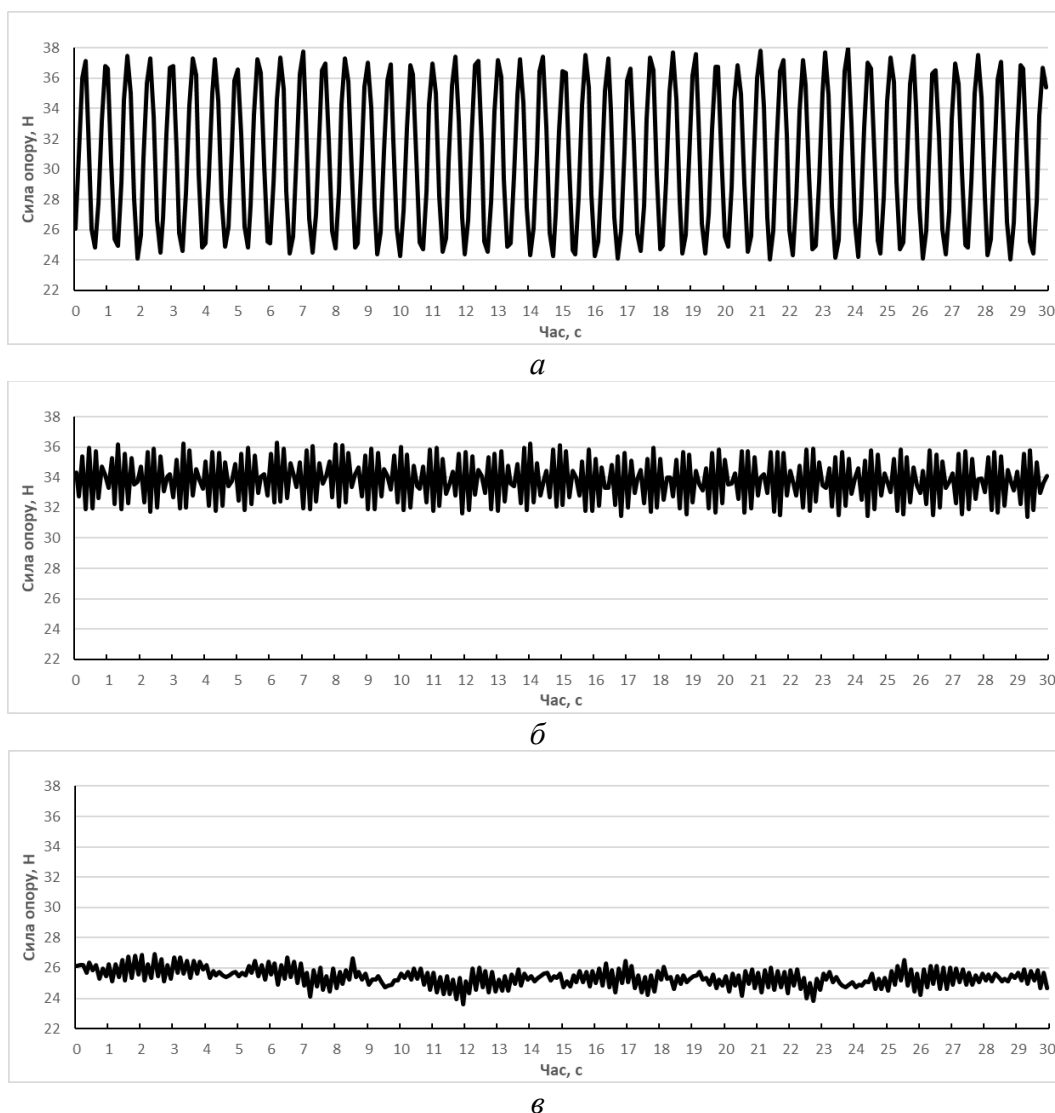


Рис. 3. Зміна величини сил лобового опору у процесі МАО при обробленні тонкої деталі порошком Полімам-М 400/315 мкм зі швидкістю: а – 1 м/с; б – 3 м/с; в – 3,5 м/с

Встановлено, що тенденції в зміні різниці мінімальних та максимальних значень не змінні при будь-яких умовах оброблення та будь-яких розмірах оброблюваної деталі [6]. Різниця мінімальних та максимальних значень спадає при збільшенні швидкості руху деталі в робочій зоні. Це може бути пов'язане зі специфічними властивостями середовища МАІ, типу Бінгамовського середовища (поведінка твердого тіла до точки зсуву та рідкого після), а також переходу умов «течії порошкового середовища» з турбулентного в ламінарний зі збільшенням швидкості руху [1].

Висновки. Виконані дослідження підтвердили наведені у попередніх роботах [1; 2] особливості поведінки МАІ при обробленні тонких деталей, а саме розрив веретеноподібних утворень на високих швидкостях оброблення і його прямий вплив на ефективність оброблення та особливостей в зміні умов взаємодії деталі зі структурними квазістабільними утвореннями в МАІ. Визначено, що вплив швидкості оброблення на силу опору руху деталі з боку МАІ, присутній при відносно високих швидкостях оброблення та відносно малих розмірах міделевого перетину деталі. Зазначене явище "зриву" і руйнування веретеноподібних формувань в МАІ при МАО тонких лопаток компресорів ГТД є підґрунтям для ефективного формування радіусів округлення кромки лопаток на фінішних етапах їх виготовлення. Подальші дослідження доцільно пов'язати з впливом розміру та форми частинок порошку на силу опору МАІ руху зразків.

Список використаних джерел

1. Майборода, В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с.
2. Степанов, О. В. Дослідження процесу формування магнітно-абразивного порошкового інструменту для обробки деталей складної геометричної форми: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Степанов Олег Васильович. – Київ, 1997. – 145 с.
3. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий. – Житомир : ПП «Рута», 2017. – 272 с.
4. Майборода, В. С. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / В. С. Майборода, К. О. Заставський, Р. Б. Жук // Технічна інженерія. – 2021. – № 2 (88). – С. 3–13.
5. Майборода, В. С. Дослідження сил лобового опору, що виникають в магнітно-абразивному інструменті при обробленні циліндричних деталей в кільцевій ванні / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, Ю. Й. Бесарабєц, І. В. Слободянюк, К. О. Заставський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні. – 2022. – № 2 (6). – С. 16-22.
6. Майборода, В. С. Дослідження сил опору з боку порошкового середовища на рух деталей при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, К. О. Заставський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні. – 2023. – № 2 (8). – С. 134-139.
7. Заставський, К. Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні / К. О. Заставський, В. С. Майборода // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – № 2. – С. 168-177.

References

1. Maiboroda, V.S. (2001). *Osnovy stvorenniya i vykorystannya poroshkovoho mahnitno-abrazyvnoho instrumentu dlya finishnoyi obrobky fasonnykh poverkhon* [Basics of creating and using a powder magnetic abrasive tool for finishing shaped surfaces] [Doctor's thesis; National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"].
2. Stepaniv, O.V. (1997). *Doslidzhennia protsesu formuvannia mahnitno-abrazyvnoho poroshkovoho instrumentu dlia obrobky detalei skladnoi heometrychnoi formy* [Study of the process of forming a magnetic-abrasive powder tool for processing parts of a complex geometric shape] [Candidate dissertation; National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"].
3. Maiboroda, V.S., Slobodianiuk, I.V., Dzhulii, D.Yu. (2017). *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detaley slozhnoy formy* [Magneto-abrasive finishing of complex shaped parts]. PP "Ruta".
4. Maiboroda, V.S., Zastavskiy, K.O., Zhuk, R.B. (2021). *Osoblyvosti vzaiemodii mahnitno-abrazyvnoho instrumentu z obrobliuva-noiu poverkhneiu v umovakh kiltsevoi vanny* [Characteristics

of the interaction between magnetic-abrasive tool and a processed surface in a circular work zone]. *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering*, 2(88), 3–13.

5. Maiboroda, V.S., Dzhulii, D.Yu., Besarabets, Yu. Jo., Slobodianiuk, I.V., Zastavskiy, K.O. (2022). Doslidzhennia syl lobovoho oporu, shcho vynykaiut v mahnitno-abrazivnomu instrumenti pry obroblenni tsylindrychnykh detalei v kiltsevii vannii [Investigation of the drag forces arising in the magneto-abrasive tool during the finishing of cylindrical parts in the annular bath]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnologii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*, 2, 16–22.

6. Maiboroda, V.S., Dzhulii, D.Yu., Zastavskiy, K.O. (2023). Doslidzhennia syl oporu z boku poroshkovoho seredovyscha na rukh detalei pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni v kiltsevii vannii [Investigation of the drag forces from the side of the powder environment on the parts movement during the magneto-abrasive finishing in the annular bath]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnologii v mashynobuduvanni – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry*, 2(8), 134–139.

7. Zastavskiy, K.O., Maiboroda, V.S. (2022). Vplyv rozmiru detalei na syly lobovoho oporu pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni [The influence of the size of details on the frontal resistance forces during magnetic abrasive finishing]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(2), 168–177.

Отримано 10.04.2024

UDC 621.923

Victor Maiboroda¹, Dmytro Dzhulii², Kostiantyn Zastavskiy³, Yurii Nalimov⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: maiborodavs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928> SCOPUS Author ID: [7004207035](https://orcid.org/0000-0001-6902-6928)

²PhD in Technical Sciences, Associate professor of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: dmytro.dzhulii@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>. SCOPUS Author ID: [57217587956](https://orcid.org/0000-0002-8863-626X)

³PhD Student of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zastavskiy96@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3372-369X>

⁴PhD in Technical Sciences, Senior Scientist of the Department of Fatigue and Crack Resistance of Structural Materials
G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength (Kyiv, Ukraine)

E-mail: Nalimov@nas.gov.ua

RESEARCH OF DRAG FORCES ON THE PART OF THE MAGNETO-ABRASIVE TOOL DURING THE FINISHING OF THIN PARTS SUCH AS THE BLADE OF A GAS TURBINE ENGINE

At low speeds of magneto-abrasive finishing of gas turbine engine blades on the machine with an annular working zone with a large magnetic gap in front of the surface being finished, the slow-moving volume of powder is formed. On the other hand, at the high speed of part movement in the working zone, the spindle-like formations break in front of the part, which causes a more active interaction of the magneto-abrasive tool with the finished surfaces. However, the previously obtained results are somewhat contradictory and require a more detailed study of the effect of the machining speed on the drag force at finishing parts of this type.

The aim of the work is the study of the drag forces, that arise in the process of magneto-abrasive finishing during the interaction of the magneto-abrasive tool with the gas turbine engine blade, depending on the technological parameters of the process.

For experimental determination of the normal drag forces during machining a thin part with a thickness of 1 mm and a height of 35 mm, was machined at a speed of movement in the working area, which varied from 1 to 3 m/s with an induction of 0.2 to 0.25 T. The behavior of the powder in the area in front of the moving part during machining by different powders and the difference between the maximum and minimum values of the drag force were analyzed.

The obtained results confirmed the previous studies of the behavior of the magneto-abrasive tool during the machining of thin parts, namely, the breaking of spindle-like formations at high machining speeds and its direct effect on the efficiency of finishing and the peculiarities of changing the conditions of the interaction of the part with the structural quasi-stable formations of the magneto-abrasive tool. It was determined that the influence of the machining speed on the drag force to the part movement by the magneto-abrasive tool occurs at relatively high machining speeds and relatively small dimensions of the middle cross-section of the part. The specified phenomenon of "breakdown" and destruction of the spindle-like formations of the magneto-abrasive tool during the machining of thin blades of gas turbine engine compressors is the basis for the effective formation of the radiuses of edges rounding of the blades on the final stages of their manufacturing.

Keywords: magneto-abrasive finishing, machining speed, magnetic induction, drag forces, middle cross-section.

Fig.: 3. References: 7.

Maksym Bolotov¹, Hennady Bolotov², Iryna Prybytko³, Mykola Korzachenko⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovmg@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

Scopus: [57190377278](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132). **Researcher ID:** [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

²Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technologies and Construction Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bolotovgp@mail.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Researcher ID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917). **Scopus:** [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding Technologies and Constructions Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: prybytko_ira@ukr.net. **Researcher ID:** [F-7325-2014](https://orcid.org/0000-0002-8550-8318)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>. **Scopus:** [57217181853](https://orcid.org/0000-0002-8550-8318)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>. **Scopus:** [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of welding Technologies and Constructions Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: korzachenko_87@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>. **Researcher ID:** [F-5177-2016](https://orcid.org/0000-0002-5674-8662)

SUSTAINABLE PRACTICES OF CONCRETE MANUFACTURING

Construction using eco-friendly, recycled or bio-materials sustainably is the way to reduce carbon footprint, natural resource depletion, which is vital for our well-being and further development of humanity. It is well known, that reinforced concrete is one of the most preferable construction materials in the many areas of application. At the same time, concrete manufacturing, Portland cement specifically, turned out to be the most polluting process with enormous amounts of CO₂ emission resulting in some environmental issues known as global warming or the greenhouse effect. To go green and minimize the issues mentioned above, the shift of our habitual concrete manufacturing practices toward more sustainable and ecologically friendly is required.

The efforts of scientists all over the World to reduce CO₂ emission and resource consumption while concrete production resulted in bio- and green concrete appearance. The idea of bio-concrete (or self-healing concrete) relies on the biomimicry concept of cement manufacturing through the adaptation of natural elements, models, patterns and systems for human problem solvation. Thus, the potential of the surrounding microbiome (germs and microbes) for concrete self-healing, particularly, for CaCO₃ reproduction when cracking starts to accrue was established.

The idea of green concrete is quite different and mainly relies on the substitution of conventional portlandite with other supplementary cementitious material such as ground granulated blast furnace slag (GGBFS), fly ash (FA), or pozzolanic one known as silica fume (SF) as well as metakaolin (MK).

This paper provides a comprehensive overview of impact of sustainable construction materials for concrete production on its mechanical properties. It was shown, that the usage of GGBFS, FA, SF or MK incorporation as a partial replacement of ordinary Portland cement while concrete production improves its mechanical properties, particularly, compressive, tensile and flexural strength.

Key words: Sustainability; concrete manufacturing; biomimicry; bio-concrete; self-healing concrete; green concrete.

Fig.: 7. Table: 8. References: 45.

Urgency of the research. Currently, the consumption of concrete takes second place after water all over the globe. This is mainly due to the fact that concrete is the most versatile manmade construction material and its application is truly widespread. However, because of its outstanding mechanical properties, particularly compressive strength and durability, concrete is extensively used as a main building material for now and its consumption is quickly ramping up [1; 2].

Target setting. As far as it's known the vast majority of modern concrete is mainly made of Portland cement as a crucial part of it, the production of which is related to the limestone baking at incredibly high temperatures [3]. The latter inevitably leads to a significant amount of CO₂ emission to the atmosphere creating an environmental warning known as global warming or greenhouse effect [4]. It is also known that almost 10 % of the total CO₂ emissions worldwide are associated with the production of concrete, as the main building material. On top of that, excessive concrete consumption has released another vital issue related to the resource depletion the water, limestone and clay in particular [5].

Actual scientific researches and issues analysis. According to [6] the Portland cement production process is as energy-intensive as the aluminum or steel manufacturing. The intention to go green and minimize natural resource consumption requires shifting our habitual concrete manufacturing practices toward the more sustainable and ecologically friendly. For these reasons, the

attention of researchers all over the world is drawn to the search for innovative ways, technologies and materials for concrete production that provide a low carbon footprint, and significantly reduce energy and resource usage or waste, which is generating pollution of our ecosystem.

The research objective. The aim of this paper is to provide a deeper understanding of the peculiarities of the newest materials and practices as modern trends of concrete manufacturing in a sustainable manner. In this case, the current paper is more of an overview.

The statement of basic materials. It is well known that along with the ecological problem related to the high amount of CO₂ emission while manufacturing, reinforced concrete backfires from the environment, in particular, chlorides attack or CO₂ itself [7, 8]. This is mainly because of the penetration of aggressive chemicals such as chlorides, sulfates let alone carbon dioxide into the pores of the concrete cement stone. This leads to a dramatic reduction in pH from ~12 to the level of ~7 – 9 inside the porous moisture of a cement stone, initiating the corrosion processes in the metal rebar [9, 10]. With the corrosion exposure on reinforcement rebar, the joining of which is typically made by arc welding, the different defects of the joint's inhomogeneity start to occur [11, 12]. The latter results in the cracking and consequent reduction in the bear capacity of the concrete structure, thus its durability [13].

For now, in order to prevent such a detrimental environmental impact on concrete by extending its lifespan along with the reduction of pollution emission during Portland cement production there are a number of highly engineered sustainable cementitious composite materials have been invented. Bio- or self-healing concrete, green concrete and ultra-high performance concrete (UHPC) should be mentioned among them.

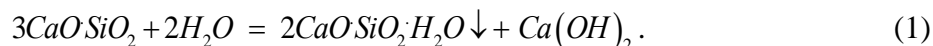
Bio-Concrete. The search for solutions to environmental issues as well as the intention of increasing the lifespan of concrete structures forced engineers to look up to nature. This became the impetus for a new modern trend in the field of engineering, which was called biomimicry, which adopted elements of natural models, patterns and systems for regenerative solutions related to sustainable development, particularly in the construction sector [14, 15].

Biomimicry in construction, first of all, is aimed to reduce CO₂ emissions, minimize resource consumption by using recycled, bio-, or eco-materials and deep implementation of construction into nature, thereby creating a non-toxic and eco-friendly architectural environment [16].

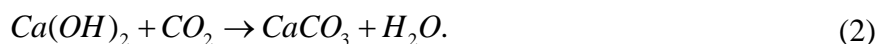
The concept of biomimicry is not new enough, but the idea of bio-concrete as an integral part of sustainable construction refers to the early 2010s. The main idea of biomimicry relies on the fact that the surrounding microbiome such as germs and microbes forcing a fight for survival in a constantly changing and extremely harsh environment have been able to adjust to it. Thus, it has been suggested that these microorganisms, who have overcome natural selection, will be able to solve of human problems related to the sustainability in construction in a long run [17].

Bio-concrete fully corresponds to this concept, as a self-healing system. Similarly to the human organism's natural repair system known as a vegetative one, which reacts to the appearance of tears or fractures by initiating certain chemical signals, followed by the delivery of regenerative biological agents to the site of injury. In terms of concrete healing, as a crack sealant agents there are the bacterial cultures that partake in limestone formation (CaCO₃) can be used. According to [18], such bacteria can be cyanobacteria, purple bacteria and methanogenic archaea that have been adapted over time and freely exist in the alkaline environment of the porous moisture of cement stone. The authors of [19] have noted, that the processes of concrete self-healing can be successful enough only in a humid environment where bacteria exists peacefully.

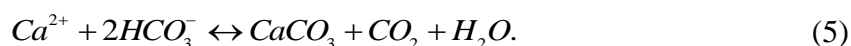
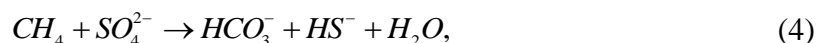
Since, as is known, Portland cement is mainly made up of calcium silicates, namely: Alite (3CaO·SiO₂) – 40 – 65% and Belite (2CaO·SiO₂) – 15 – 40%, which are products of limestone and clay processing. In the process of water saturation of cement stone from the environment, its hydration takes place. As a result, calcium hydroxide Ca(OH)₂ is formed, which is usually called a pore liquid or moisture:



In turn, the porous moisture $Ca(OH)_2$ reacting with atmospheric CO_2 results in a calcium carbonate ($CaCO_3$) formation with excess water [20]:



Thus, the mechanism of concrete restoration using bacteria is carried out mainly through the transformation of CO_2 to carbonate. The reaction of concrete healing, in this case, can be explained as follows [19]:



Here oxygen and carbon dioxide entering the cement stone from the environment are transformed into methane (CH_4) as a result of methanogenesis, as a by-product of the archaea's activity. Sulfates (SO_4^{2-}), that also penetrate the capillaries of cement stone from the outside, serve as a kind of chemical pulses for the activation of regenerative agents, oxidizing methane to form anaerobic bicarbonates (HCO_3^- , $2HCO_3^-$), which, in turn, reacting with calcium ions (Ca^{2+}), restores of limestone. This is exactly the way of autogenous healing of concrete. However, it should be understood that the processes of a concrete self-healing are not well-developed for now and it's mainly of a presumption.

Green concrete. Another way of environmental menace reduction while concrete production is the use of ecologically oriented materials and processes instead of conventional ones. The term "green concrete" is relatively new and mostly refers to the second half of the 2010s. The process of green concrete manufacturing is closely intertwined with the use of recycled or natural coarse aggregates as well as alternative binders are designed to reduce the carbon footprint downsizing natural resources consumption [21; 22].

The comprehensive literature overview allowed us to differentiate the next categories of environmentally enhanced materials for green concrete production: 1) Concrete with the ground granulated blast furnace slag (GGBFS); 2) Concrete with fly ash (FA); 3) Concrete with the silica fume (SF); 4) Concrete with the metakaolin (MK).

As far as it's known the slag is the side-product of cast iron smelting in a blast furnace or converters [23, 24]. It possesses incredible binding properties that make the slag so attractive as an active supplementary cementitious material for construction in a sustainable manner.

The impact of GGBFS incorporation in a cement mixture at a different percentage on the compressive strength of concrete was comprehensively studied at [25].

The studies were carried out after 7, 28 and 90 days of concrete aging with the complete number of tests of 65. The obtained results were compared with the similar, obtained for a 100% Portland cement mixture. The results of concrete compressive strength depending on w/b (water/binder) ratio for 10, 20, 40, 55, 60 and 80% of the slag replacement level are given in Fig. 1.

Analyzing the obtained results the authors have noticed that concrete compressive strength with the 10% of slag replacement after 7 days of aging was quite lower rather than conventional concrete mixture with 100% of Portland cement. The value of concrete compressive strength goes up with the increase in GGBFS replacement up to 60% for 28 and 90 days of aging exceeding such a value for conventional concrete.

The authors have also admitted the reduction in water consumption in a w/b ratio as the GGBFS percentage increases in a concrete mixture. The authors emphasize that the mixture with 60% of slag is an optimal one. Such results are in close agreement with those, obtained in [26].

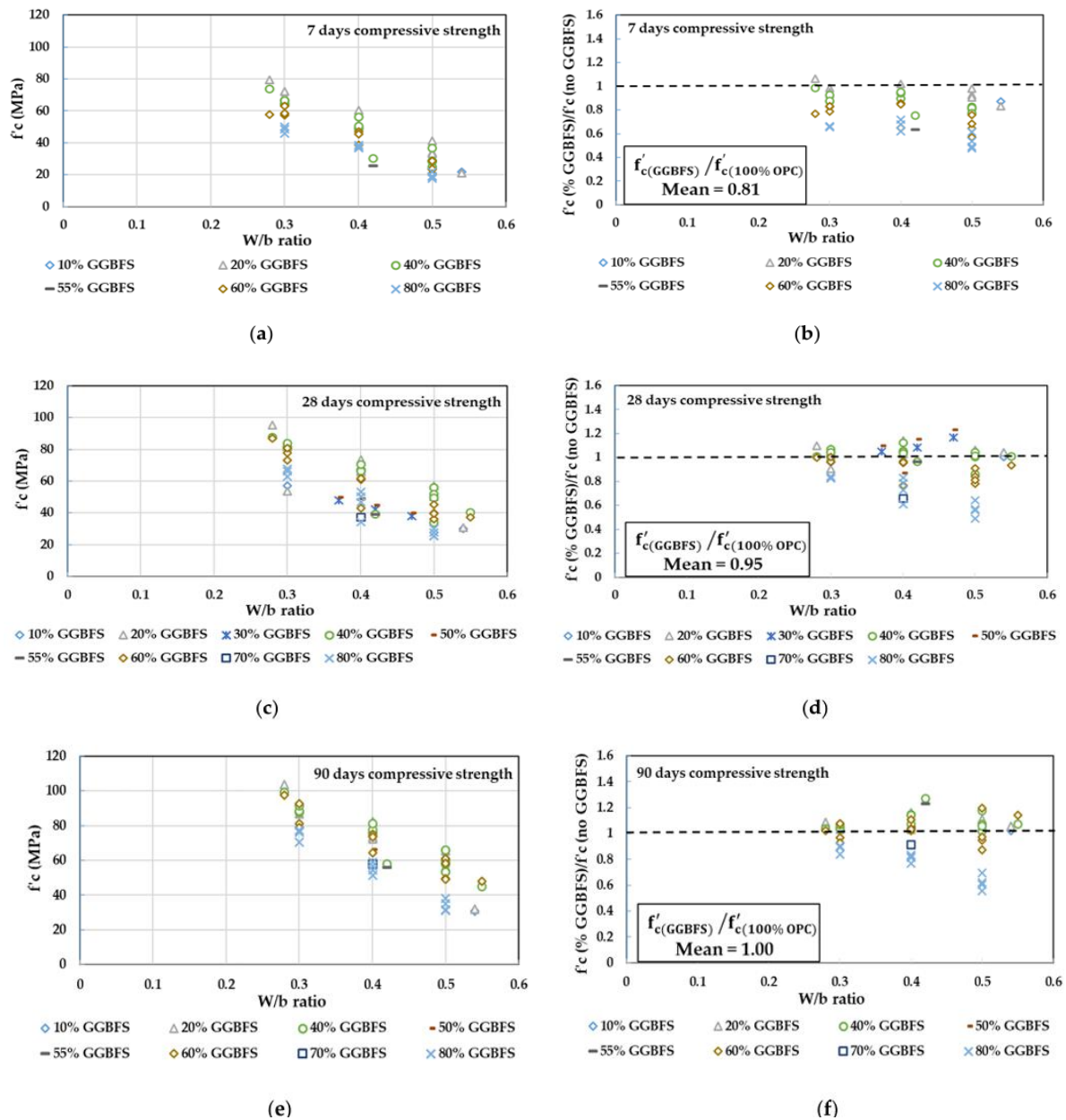


Fig. 1. GGBFS cement replaced concrete compressive strength depending on W/b ratio at: 7 days (a); 28 days (c); 90 days (e) of aging. Compressive strength of GGBFS/100% Portland cement ratio at 7 days (b); 28 days (d); 90 days (f) of aging [25]

On the other hand, the usage of pulverized fuel ash, mostly known as fly ash (FA), for Portland cement replacement while concrete manufacturing has also been known and widely applied. However, the long-term industrial application of concrete with FA replacement has shown the necessity of strict limitation of FA especially at higher replacement levels. In this case, as was shown in [27], the optimal percentage of FA in concrete is mainly revolving around 15 – 20%. In [28] was also shown that a high percentage of FA replacement in a concrete mixture (beyond 30%) leads to retardation of strength development and hence, reduced early concrete strength. In [29] it was also noticed that an excessive amount of FA (about 50 – 70%) in concrete mixture inevitably leads to compressive strength reduction compared to the reference one.

The authors of [28] have also revealed that the incorporation of FA in concrete reduces its permeability, thus increasing compressive strength. The four concrete mixes with 0% (neat concrete), 15%, 30% and 45% of FA with the same W/b ratio of 0.6 were studied. The coarse (1195 kg/m³) as well as fine aggregates (565 kg/m³) were used. The composition of concrete mixtures is given in Table 1.

Table 1 – The composition of concrete mixtures [28]

Mix	W/B	PFA %	Mix Proportions (in kg/m ³)				
			OPC	PFA	Water	CA	FA
PFA0	0.6	0	383	-	230	1195	562
PFA15	0.6	15	325.5	57.5	230	1195	562
PFA30	0.6	30	268	115	230	1195	562
PFA45	0.6	45	210.6	172.4	230	1195	562

Compressive strength tests were conducted after 3, 7, 28, 59 and 91 days of exposure according to BS EN 12390-3:2009. The results of compressive strength tests at specified ages are shown in Fig. 2 and Table 2.

Table 2 – The results of concrete compressive strength tests [28]

Mix	Age (in days)				
	3	7	28	59	91
PFA0	20.96	27.69	36.99	42.67	34.89
PFA15	16.00	21.69	32.25	43.41	38.65
PFA30	14.42	17.94	32.60	36.50	41.94
PFA45	8.53	11.20	21.27	24.54	35.95

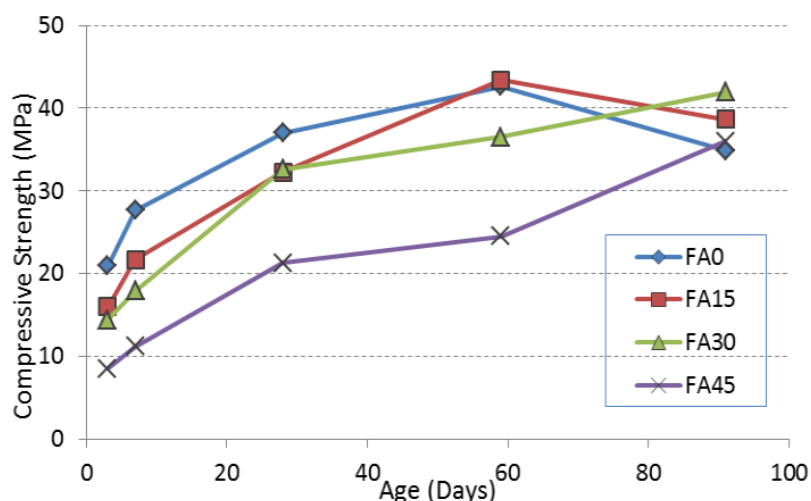


Fig. 2. Compressive strength development at different PFA replacement values [28]

Analyzing the obtained results, the authors have noticed the highest compressive strength about 20.96 MPa and 27.69 MPa for 100% Portland cement mix (PFA0) at the early age of 3 and 7 days, accordingly. This is mainly because of the higher hydration rate of pure cement at an early age. Meanwhile, the lowest values of a concrete compressive strength in the early days of aging about 8.53 MPa and 11.20 MPa for the PFA45 mix with the highest FA replacement were observed.

However, adding FA in a cement mixture of about 15 to 30% seems beneficial in the long run. Thus, in accordance with the results, the PFA15 and PFA30 concrete mixtures provide the highest level of concrete strength about 43.41 MPa for 59 days and 41.94 MPa for 91 days of aging accordingly. The authors have concluded that the incorporation of FA with the value of 15 – 30% replacement into a concrete mixture allows for reducing its permeability improving later age compressive strength.

The long-term industrial practices have set another effective way of concrete mechanical properties and dynamic behavior enhancement replacing ordinary Portland cement (OPC) with the pozzolans [30]. In [31, 32] it was shown that the use of silica fume (SF) as a substitutional material in concrete manufacturing leads to the increase of its compressive strength and flexural strength improving corrosion behavior and durability of concrete structure as a whole. On top of that, the good rheological properties of SF because of the microscopic size of its particles (about 0.1 to 0.5 μm in diameter) provide SF with an excellent filling effect that can easily fill the gaps in the cement past reducing its pore size and capillaries, contributing to a more dense and homogeneous concrete [33].

Considering the mentioned above, the practice of OPC replacement with the SF for concrete mechanical properties improvement has sparked an enormous interest of engineers and researchers all over the globe.

The impact of SF replacement on the mechanical properties of concrete, specifically its compressive and tensile strength was studied in [34]. In their research, the samples of 75 mm in diameter and 150 mm in height containing different percentages of SF, as given in Table 3, were subjected to quasi-static and dynamic loading tests. For this purpose, the MTS testing machine is equipped with a computing system, speed-regulating system as well deceleration system. The external view of specimens before testing is given in Fig. 3.

Table 3 – Mix proportion of concrete with different SF levels by weight [34]

Mass of Concrete Ingredients (kg/m ³)					
Items	Water	Cement	SF	Fine Aggregate	Aggregate
I	210.00	389.00	-	614.00	1141.00
II	210.00	340.80	48.20	614.00	1141.00
III	210.00	326.28	62.72	614.00	1141.00



Fig. 3. Images of the series I, II, III (according to Table 3) concrete for quasi-static and dynamic tests [34]

The experimentally obtained results the authors have shown in the form of Table 4.

Table 4 – The compressive strength and the tensile strength of tested concrete under quasi-static loading [34]

Concrete Series	Strength (MPa)	
	Compressive Strength	Tensile Strength
I	19.73	1.78
II	21.54	2.03
III	23.03	2.32

Analyzing the obtained results authors have admitted that due to the high concrete strength with the SF replacement in it, some difficulties associated with the distraction of these samples compared to the low-strength concrete containing 100% of OPC`s were observed. Thus, in their studies, the samples containing 48.2 kg/m³ (Series II) and 62.75 kg/m³ (Series III) of SF show a greater value of compressive and tensile strength of 21.54 MPa and 2.03 MPa for samples Series II and about 23.03 MPa and 2.32 MPa for samples Series III accordingly. At the same time, such a value for 100% OPC concrete doesn't exceed 19.73 and 1.78 MPa accordingly.

Nevertheless, the prevalent majority of researchers emphasize that the percentage of SF in concrete should be strictly limited to a range of 15 – 25%, otherwise, the excessive SF incorporation leads to a dramatic decrease in concrete compressive and tensile strength [35-37].

The authors of [38] investigating of SF replacement in reinforced concrete columns have also admitted that the total strain of concrete columns goes down dramatically with an increase in SF replacement level. In their research, the amount of SF replacement was 0% (as OPC), 11%, 13%, 15% and 17%. The samples in the form of a column sized 150×150×700 mm were prepared according to the IS 10262:2009. The mechanical tests were carried out after 28 days of aging. The water/binder (cement) ratio in the concrete mixtures was set at 0.42 and 0.50. The mixture design details are presented in Table 5.

Table 5 – The details of a concrete mixture [38]

W/C – 0.42				W/C – 0.50			
Water	Cement	Fine aggregates	Coarse aggregates	Water	Cement	Fine aggregates	Coarse aggregates
197	469.04	669.04	1106.54	197	394	710.7	1123.92
0.42	1.00	1.42	2.35	0.50	1	1.80	2.85

The series of tests depending on a different content of SF replacement in a concrete at the water/cement ratio of 0.42 and 0.50 are given in Table 6.

Table 6 – The number of tests depending on a SF replacement percentage [38]

Sample`s N ^o	W/C ratio	% of SF
CU1	0.42	0
CU2		11
CU3		13
CU4		15
CU5		17
CU6	0.50	0
CU7		11
CU8		13
CU9		15
CU10		17

The results of compressive strength tests for all specimens are given in Table 7 and Fig. 4.

Table 7 –The results of compressive strength tests of concrete columns incorporated with different amounts of SF [38]

W/C ratio	Series	SF, %	Load, kN	Comp. strength, N/mm ²	W/C ratio	Series	SF, %	Load, kN	Comp. strength, N/mm ²
0.42	C1	0	406.9	18.07	0.50	C6	0	418.74	18.61
	C2	11	495.20	22.01		C7	11	592.57	26.33
	C3	13	744.26	33.07		C8	13	799.19	35.52
	C4	15	550.48	24.44		C9	15	653.95	29.06
	C5	17	452.53	20.11		C10	17	615.95	27.37

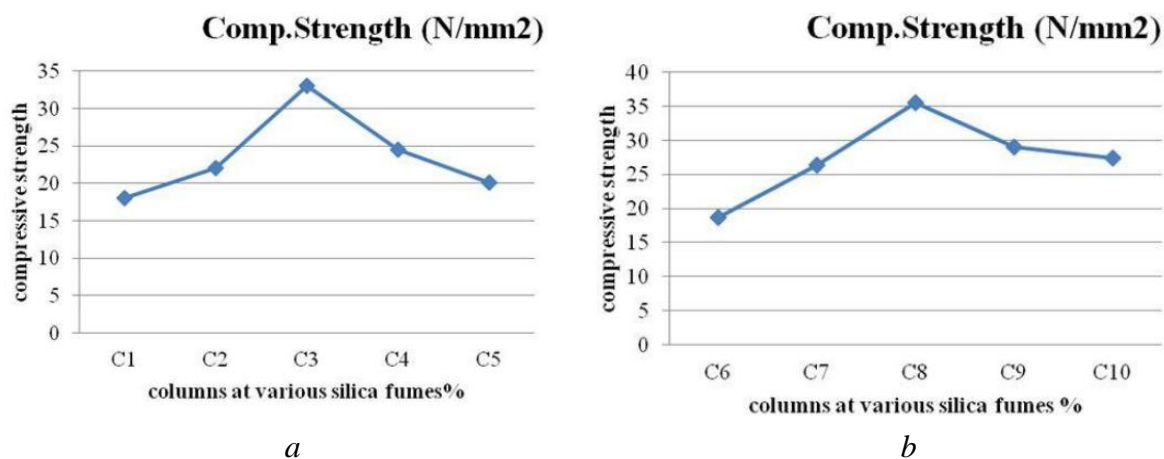


Fig. 4. The results of compressive strength tests of concrete columns with the different percentages of SF replacement for W/C ratio 0.42 (a) and 0.50 (b) [38]

The obtained results have shown that samples with 100% of OPC (without SF incorporation) series C1 and C6 failed at a lower load level of 406.9 kN and 418.74 kN accordingly. Thus, they possess a lower level of compressive strength about 18.07 N/mm² for C1 and 18.61 N/mm² for C6 respectively. The external view of column without SF under the compressive load shown in Fig. 5.



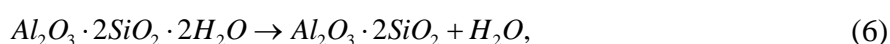
Fig. 5. Failure pattern of a concrete column with a 100% of OPC [38]

Instead, increasing the SF replacement in a concrete mixture up to 13% leads to a spike of concrete compressive strength up to 33.07 N/mm² and 35.52 N/mm² for C3 and C8 respectively. With the further increasing the SF percentage in concrete up to 17% the authors have observed a certain decrease in compressive strength to a level of 20.11 N/mm² and 27.37 N/mm² for C5 and C10 accordingly.

Thus, the authors have concluded that the concrete mix with 13% silica fumes possesses a higher compressive strength compared to the other concrete mixes with or without SF.

Metakaolin (MK) is another alternative binder, that found a widespread application in a partial cement replacement. It is held as a more reactive one compared to the FA or SF that is made MK more preferable binder material, especially in hostile chlorides marine areas [39].

Unlike GGBFS, FA and SF, metakaolin is produced mainly via the calcination (dehydration) of kaolin clay at high temperatures ranging from 650 °C up to 800 °C [40]. The reaction of kaolin clay calcination looks as follows [40]:



Because of the endothermic kind of reaction of kaolin clay dehydration, an amorphous aluminosilicate called metakaolin has been released. Normally MK is a white to light grey colored powder with an average particle size of about 1 – 5 μm that is far less than an OPC’s particle size measuring about 10 μm [41].

Numerous studies have shown that the use of MK as a supplementary cementitious material while concrete manufacturing provides better mechanical properties and corrosion behavior improving concrete resistance to aggressive environments, in particular, to the chlorides attack [42].

In work [43], the investigation of the mechanical performance of metakaolin-based concrete, the authors have stated, that 10% MK replacement in concrete is the best way of its strength development compared to the concrete with SF replacement. Such a result is in close agreement with results, obtained in [39]. In their tests, concrete samples containing 0%, 5%, 10%, 15% and 20% of MK replacement were examined. Detailed information about testing concrete mixtures is given in Table 8.

Table 8 – Concrete mix proportions used for the experimental investigations [39]

Mix	w/b	Water (l)	Binder (kg)		Stone (kg)	Sand (kg)
			OPC	MK		
0% MK	0.54	19	35	0	101	59
5% MK	0.54	19	33	1.8	101	58
10% MK	0.57	20.5	32	4	101	60
15% MK	0.58	20.5	30	5	101	58
20% MK	0.61	21.5	28	7	101	67

The concrete samples in the form of cubes measuring 150×150×150 mm and beams of 150×150×500 mm were subjected to mechanical tests to determine their compressive and flexural strength. The investigation was carried out after 7, 28 and 56 days of aging. The results of mechanical tests have been graphically represented in Fig. 6 and Fig.7.

The experimentally obtained results have shown that MK’s incorporated concrete possesses a higher compressive and flexural strength compared to the ordinary one. The authors have attributed this to a good pozzolanic reaction of MK with Ca(OH)₂ resulting in the formation of calcium silica hydrate (C-S-H) gel. The latter provides an excellent filling effect creating strong bonds with the cement particles [44]. Increasing in the exposure from 7 up to 56 days resulted in the rise of mechanical properties of examined samples. This is mainly because sufficient curing conditions were provided during 28 and 56 days. It should also be noted, that there is a small difference between values of compressive and flexural strength after 28 and 56 days of aging.

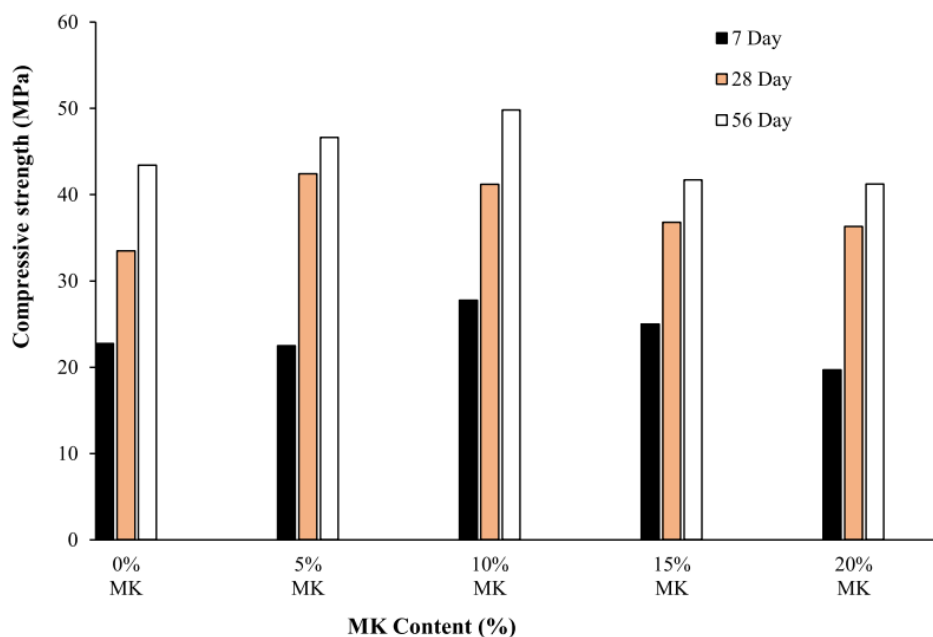


Fig. 6. Compressive strength of concrete with the different percentages of MK replacement after 7, 28 and 56 days of aging [39]

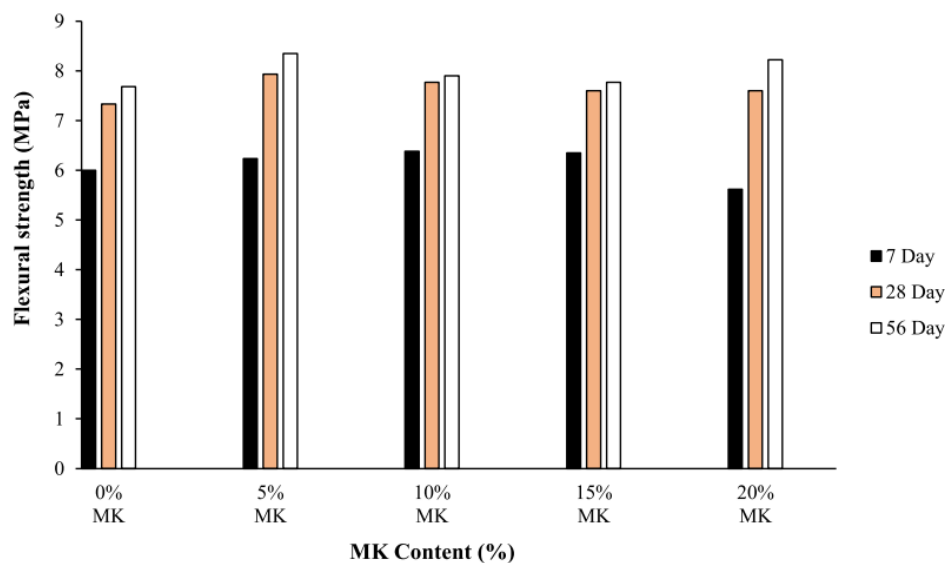


Fig. 7. Flexural strength of concrete with the different percentages of MK replacement after 7, 28 and 56 days of aging [39]

At the same time, the authors have noted a lower value of concrete compressive strength with both 5% and 20% MK replacement at an early age of 7 days. The values of compressive strength of such samples do not exceed 22.49 MPa and 19.69 MPa respectively. Instead, the authors of [45] have emphasized that nearly 10% of MK replacement, specifically at the early age of 3 days, is the best mix for a good concrete compressive strength. It is worth mentioning, that in their experiments the w/b ratio doesn't exceed 0.3. While in [39] the w/b ratio for mixes with 5% and 20% of MK for 7 days was much higher exceeding reference one with 100% of OPCs (0.54 and 0.61 for 10% and 20% of MK's versus 0.54 for reference sample). Thus, in their experiments, the maximum compressive strength was obtained with the mix, containing 5% and 10% of MK replacement.

The authors have also pointed out the reduction in flexural strength with the increase in w/b ratio. The minimum value of flexural strength of 5.62 MPa in their experiments was obtained after 7 days for the 20% MK mix with the highest w/b value of 0.61. However, with the aging of concrete up to 56 days its flexural properties were improved to a level of 7.68 MPa, similar to the 5% MK mix for the same days of aging.

At the same time, the authors of [25] have come to the following conclusions:

At the same time, the authors of [25] has come to the following conclusions:

1. The MK incorporation into the concrete mixture shows higher compressive strength compared to the reference one with 100% OPCs at 7 days of aging;
2. The w/b ratio as well as the percentage of MK replacement has a massive impact on concrete compressive strength;
3. The w/b ratio in the range of 0.32 – 0.5 with the 10 – 30% MK incorporation provides the concrete compressive strength on a level of 40 – 60 MPa after 7 days of curing;
4. The simultaneous reduction in w/b ratio to 0.3 – 0.36 and MK replacement to 10 – 20 % increases in concrete compressive strength up to 60 – 80 MPa respectively;
5. The higher concrete strength was obtained after 28 days with the 5% to 15% MK replacement and a w/b ratio of 0.27 – 0.3;
6. Presumably, the concrete's compressive strength with MK incorporation will further improve with the increase of its curing duration.

Conclusions. In this review, the sustainable approaches of concrete manufacturing practices based on the application of environmentally oriented binder materials were provided. It was shown, that the usage of GGBFS, FA, SF or MK incorporation as a partial replacement of ordinary Portland cement during concrete production, improves its mechanical properties, particularly, compressive, tensile and flexural strength. However, the long-term industrial application of these supplementary cementitious materials has shown the necessity of their strict limitation and the w/b ratio. Based on the mentioned above, it can be concluded that concrete with 50 – 60 % GGBFS replacement is quite effective in terms of its compressive strength enhancement after 28 and 90 days of aging with w/b ratio of 0.28.

In turn, adding 15 – 30% of FA into a concrete mix provides higher values of concrete mechanical properties, and compressive strength, particularly, about 41.94 – 43.41 MPa for 59 days of curing. Instead, the SF and MK show greater early days strength, compared to conventional concrete filled with 100% OPC.

As an optimal, the mix containing 13% SF replacement with the w/b ratio of 0.42–0.50 as one providing the highest level of concrete mechanical performances about 33.07–35.52 MPa, should be highlighted. At the same time, the 10% of MK incorporation with w/b ratio ranging 0.3 – 0.4 increases concrete compressive strength up to 40–50 MPa.

References

1. Leising, E., Quist, J., Bocken, N. (2018). Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. *J. Clean. Prod.*, 176, 976–989.
2. Gursel, A.P., Maryman, H., Ostertag, C. (2016). A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. *J. Clean. Prod.*, 112, 823–836.
3. Cebri' an, G., Junyent, M., Mula, I. (2020). Competencies in education for sustainable development: emerging teaching and research developments. *Sustainability*, 12(2), 579.
4. Adesina, A., (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environ. Challenges*, 1, 100004.
5. Andrew, R.M. (2017). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 195–217.
6. Tarun, R., Asce, F. (2008). Sustainability of concrete construction. *Practice periodical on structural design and construction*, 13(2).
7. Chalee, W. Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P. (2009). Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures*, 22(3), 341-353.

8. Broomfield, J.P. (2023). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair* (3rd ed.). CRC Press.
9. Bolotov, M.H., Bolotov, H.P., Pribytko, I.O., Korzachenko, M.M. (2019). Ways of increasing the corrosion resistance of reinforced concrete. *Bulletin of the ChNTU. Technical sciences and technologies*, 4 (18), 247-258.
10. Bolotov, M.H. (2018). Analytical review of the main causes and consequences of building and construction accidents that have occurred on the territory of Ukraine over the past five years. *Bulletin of ChNTU*, 4, 197-204.
11. Bolotov, H.P., Bolotov, M.H., Oleksienko, S.V. (2015). Manual arc welding of structural steels with a low-ampere arc with modulated current. *Bulletin of the ChNTU. Technical sciences and technologies*, 1(1), 48-53.
12. Bolotov, M.H., Bolotov, H.P., Haneev, T.R., Korzachenko, M.M. (2017). Assessment of the bearing capacity of welded joints of reinforced concrete reinforcement. *Bulletin of the ChNTU. Technical sciences and technologies series*, 1(7), 58-67.
13. Bolotov, H., Tsybulya, S., Bolotov, M., Pribytko, I., Yushchenko, S. (2022). Analysis of the effectiveness of the use of migrating corrosion inhibitors (MIC) to increase the service life of reinforced concrete. *Technical sciences and technologies*, 1(27), 199–210.
14. Pacheco-Torgal, F. and Labrincha, J.A. (2013). Biotech cementitious materials: Some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability. *Construction and Building Materials*, 40, 1136-1141.
15. Achal, V., Mukerjee, A. and Reddy, M. S. (2013). Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 48, 1-5.
16. Matthews, F. (2011). *Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry Organizations & Environment*. Sage Publications (PP. 1-24).
17. Silva, F.B. et al. (2015). Industrial application of biological self-healing concrete: Challenges and economic feasibility. *Journal of Commercial Biotechnology*, 21(1), 31-38.
18. Adekunle, P., Aigbavboa, C., & Akinradewo, O. (2021). Intervention of Biomimicry for Sustainable Construction. The use of Bio-Concrete. *Journal of Agronomy, Technology and Engineering Management*, 4, 641-648.
19. Seifan, M., Samani, A.K., & Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Appl Microbiol Biotechnol*, 100, 2591–2602.
20. Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 31(212), 563-567.
21. Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Eng.*, 95, 305–320.
22. Liew, K.M., Sojobi, A.O., Zhang, L.W. (2017). Green concrete: Prospects and challenges. *Constr. Build. Mater.*, 156, 1063–1095.
23. Divsholi, B.S., Yang, T., Lim, D., Teng, S. (2014). Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete. *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 8, 157–164.
24. Elchalakani, M., Aly, T., Abu-Aisheh, E. (2014). Sustainable concrete with high volume GGBFS to build Masdar City in the UAE. *Case Stud. Constr. Mater.*, 1, 10–24.
25. Al-Hamrani, A., Kucukvar, M., Alnahhal, W., Mahdi, E., Onat, N.C. (2021). Green Concrete for a Circular Economy: A Review on Sustainability, Durability, and Structural Properties. *Materials*, 14, 351.
26. Oner, A., Akyuz, S. (2007). An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 29, 505–514.
27. Bambang S., (2014). Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment. *Procedia Engineering*, 95, 305-320.
28. Duraman, S. & Omar, M. (2019). Durability of pulverised fuel ash (PFA) concrete exposed to acidic and alkali conditions. *MATEC Web of Conferences*, 258. 05015. 10.1051.
29. Naik, T.R., Singh, S.S., Hossain, M.M., Fellow, P., Science, A. (1994). Permeability of concrete containing large amounts of fly ash. *Cem. Concr. Res.*, 24, 913–922.
30. Shannag, M. (2000). High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cem. Concr. Compos.*, 22, 399–406.

31. Sarıdemir, M. (2014). Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. *Constr. Build. Mater.*, 49, 484–489.
32. Duan, P., Yan, C., Zhou, W. (2017). Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle. *Cem. Concr. Compos.*, 78, 108–119.
33. Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H. (2009). Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates. *Cem. Concr. Compos.*, 31, 769–775.
34. Zhao, S., Zhang, Q. (2019). Effect of Silica Fume in Concrete on Mechanical Properties and Dynamic Behaviors under Impact Loading. *Materials*, 12(19), 3263.
35. Kheidr, S., Abou-Zeid, M. (1995). Characteristics of silica-fume concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 6, 357–375.
36. Mazloom, M., Ramezani-pour, A., Brooks, J.J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 26, 347–357.
37. Wong, H.S., Razak, H.A. (2005). Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. *Cem. Concr. Res.*, 35, 696–702.
38. Iyellapogu, A., Venkata, R., Katukuri, H. (2018). Behaviour of silica fumes on reinforced concrete columns. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5, 2347–4718.
39. Pillay, D. L., Olalusi, O. B., Kiliswa, M. W. (2002). Engineering performance of metakaolin based concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100383.
40. Khater, H. (2011). Influence of Metakaolin on Resistivity of Cement Mortar to Magnesium Chloride Solution. *Ceramics – Silikáty*, 54, 325–333.
41. Sabir, B., Wild, S., Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement Concr. Compos.*, 23 (6), 441–454.
42. Song, H.-W., Lee, C.-H., Ann, K. Y. (2008). Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 113–121.
43. Zhang, M., Malhotra, V. (1995). Characteristics of a thermally activated alumina-silicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cem. Concr. Res.*, 25, 1713–1725.
44. Wild, S., Khatib, J.M., Jones, A. (1996). Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cem. Concr. Res.*, 26, 1537–1544.
45. Khatib, J.M., Hibbert, J.J. (2005). Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Constr. Build. Mater.*, 19, 460–472.

Список використаних джерел

1. Leising, E. Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool / Leising E., Quist J., Bocken N. // *J. Clean. Prod.* – 2018. – Vol. 176. – Pp. 976–989.
2. Gursel, A.P. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash / Gursel A.P., Maryman H., Ostertag C. // *J. Clean. Prod.* – 2016. – Vol. 112. – Pp. 823–836.
3. Cebri´ an, G. Competencies in education for sustainable development: emerging teaching and research developments / Cebri´ an G., Junyent M., Mula I. // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12(2). – P. 579.
4. Adesina, A. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions / Adesina A. // *Environ. Challenges*. – 2020. – Vol. 1. – P. 100004.
5. Andrew, R.M. Global CO2 emissions from cement production / Andrew, R.M. // *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* – 2017. – Pp.195–217.
6. Tarun, R. Sustainability of concrete construction / Tarun R., Asce F. // *Practice periodical on structural design and construction*. – 2008. – Vol. 13(2).
7. Chalee, W. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater / Chalee W., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. // *Marine Structures*. – 2009. – Vol. 22(3). – Pp. 341–353.
8. Broomfield, J.P. *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair* (3rd ed.) / J.P. Broomfield. – 2023. – P. 304.
9. Шляхи підвищення корозійної стійкості залізобетону / М. Г. Болотов, Г. П. Болотов, І. О. Прибилько, М. М. Корзаченко // *Вісник ЧНТУ. Технічні науки та технології*. – 2019. – № 4(18). – Ст. 247–258.
10. Болотов, М. Г. Аналітичний огляд основних причин та наслідки аварій будівель та споруд, що сталися на території України за останні п’ять років / М. Г. Болотов // *Вісник ЧНТУ*. – 2018. – № 4. – С. 197–204.

11. Болотов, Г. П. Ручне дугове зварювання будівельних сталей малоамперною дугою модульованим струмом / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, С. В. Олексієнко // Вісник ЧНТУ. Технічні науки та технології. – 2015. – № 1(1). – С. 48-53.
12. Оцінка несучої здатності зварних з'єднань арматури залізобетону / М. Г. Болотов, Г. П. Болотов, Т. Р. Ганєєв, М. М. Корзаченко // Вісник ЧНТУ. Серія Технічні науки та технології. – 2017. – № 1(7). – С. 58-67.
13. Аналіз ефективності застосування мігруючих інгібіторів корозії (МІК) для підвищення експлуатаційної довговічності залізобетону / Г. Болотов, С. Цибуля, М. Болотов, І. Прибитько, С. Ющенко // Технічні науки та технології. – 2022. – № 1(27). – С. 199–210.
14. Pacheco-Torgal F. Biotech cementitious materials: Some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability / Pacheco-Torgal, F. and J.A. Labrincha // Construction and Building Materials. – 2013. – No 40. – Pp. 1136- 1141.
15. Achal V. Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures / V. Achal, A. Mukerjee, M. Sudhakara Reddy // Construction and Building Materials. – 2013. – No 48. – Pp. 1-5.
16. Mattews F. Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry Organizations & Environment / Mattews F. // Sage Publications, 2011. – Pp.1-24.
17. Silva, F.B. Industrial application of biological self-healing concrete: Challenges and economic feasibility / Silva F.B. et al. // Journal of Commercial Biotechnology. – 2015. – № 21(1). – Pp. 31-38.
18. Adekunle, P. Intervention of Biomimicry for Sustainable Construction: The use of Bio-Concrete / P. Adekunle, C. Aigbavboa, O. Akinradewo // Journal of Agronomy, Technology and Engineering Management. – 2021. – Vol. 4(5). – Pp. 641-648.
19. Seifan, M. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete / M. Seifan, A.K. Samani, A. Berenjian // Appl Microbiol Biotechnol. – 2016. – Vol. 100. – Pp. 2591–2602.
20. Hearn, N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? / N. Hearn // Materials and Structures/Materiaux et Constructions. – 1998. – Vol. 31(212). – Pp. 563-567.
21. Suhendro, B. Toward green concrete for better sustainable environment / B. Suhendro // Procedia Eng. – 2014. – Vol. 95. – Pp. 305–320.
22. Liew, K.M. Green concrete: Prospects and challenges / K.M. Liew, A.O. Sojobi, L.W. Zhang // Constr. Build. Mater. – 2017. – Vol. 156. – Pp. 1063–1095.
23. Divsholi, B.S. Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete / B.S. Divsholi, T. Yang, D. Lim, S. Teng // Int. J. Concr. Struct. Mater. – 2014. – Vol. 8. – Pp. 157–164.
24. Elchalakani, M. Sustainable concrete with high volume GGBFS to build Masdar City in the UAE / M. Elchalakani, T. Aly, E. Abu-Aisheh // Case Stud. Constr. Mater. – 2014. – Vol. 1. – Pp.10–24.
25. Green Concrete for a Circular Economy: A Review on Sustainability, Durability, and Structural Properties / Al-Hamrani, A., Kucukvar, M., Alnahhal, W., Mahdi, E., Onat, N.C. // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 351.
26. Oner, A. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete / A. Oner, S. Akyuz // Cem. Concr. Compos. – 2007. – Vol. 29. – Pp. 505–514.
27. Bambang, S. Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment / S. Bambang // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 95. – Pp. 305-320.
28. Duraman, Saiful. Durability of pulverised fuel ash (PFA) concrete exposed to acidic and alkali conditions / Duraman Saiful, Omar Md. // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 258, 05015. – 10.1051.
29. Permeability of concrete containing large amounts of fly ash / T.R. Naik, S.S. Singh, M.M. Hossain, P. Fellow, A. Science // Cem. Concr. Res. – 1994. – Vol. 24. – Pp. 913–922.
30. Shannag, M. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume / M. Shannag // Cem. Concr. Compos. – 2000. – Vol. 22. – Pp. 399–406.
31. Saridemir, M. Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete / Saridemir, M. // Constr. Build. Mater. – 2014. – Vol. 49. – Pp. 484–489.
32. Duan, P. Compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer blended with silica fume under thermal cycle / P. Duan, C. Yan, W. Zhou // Cem. Concr. Compos. – 2017. – Vol. 78. – Pp. 108–119.

33. Shekarchi, M. Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates / M. Shekarchi, A. Rafiee, H. Layssi // *Cem. Concr. Compos.* – 2009. – Vol. 31. – Pp.769–775.
34. Zhao, S. Effect of Silica Fume in Concrete on Mechanical Properties and Dynamic Behaviors under Impact Loading / S. Zhao, Q. Zhang // *Materials.* – 2019. – Vol. 12(19). – P. 3263.
35. Khedr, S. Characteristics of silica-fume concrete / S. Khedr, M. Abou-Zeid // *J. Mater. Civ. Eng.* – 1995. – Vol. 6. – Pp. 357–375.
36. Mazloom, M. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete / M. Mazloom, A. Ramezani-pour, J.J. Brooks // *Cem. Concr. Compos.* – 2004. – Vol. 26. – Pp.347–357.
37. Wong, H.S. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance / H.S. Wong, H.A. Razak // *Cem. Concr. Res.* – 2005. – Vol. 35. – Pp.696–702.
38. Iyellapogu, A. Behaviour of silica fumes on reinforced concrete columns / A. Iyellapogu, R. Venkata, H. Katukuri // *International Journal of Research in Engineering and Technology.* – 2018. – Vol. 5. – Pp. 2347–4718.
39. Pillay, D. L. Engineering performance of metakaolin based concrete / D. L. Pillay, O. B. Olalusi, M. W. Kiliswa // *Cleaner Engineering and Technology.* – 2002. – Vol. 6. – 100383.
40. Khater, H. Influence of Metakaolin on Resistivity of Cement Mortar to Magnesium Chloride Solution / H. Khater // *Ceramics – Silikáty.* – 2011. – Vol. 54. – Pp. 325-333.
41. Sabir, B. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review / B. Sabir, S. Wild, J. Bai // *Cement Concr. Compos.* – 2001. – Vol. 23 (6). – Pp. 441–454.
42. Ha-Won Song. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments / Ha-Won Song, Chang-Hong Lee, Ki Yong Ann // *Cement and Concrete Composites.* – 2008. – Vol. 30, Issue 2. – Pp. 113-121.
43. Zhang, M. Characteristics of a thermally activated alumina-silicate pozzolanic material and its use in concrete / M. Zhang, V. Malhotra // *Cem. Concr. Res.* – 1995. – Vol. 25. – Pp. 1713–1725.
44. Wild, S. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete / S. Wild, J.M. Khatib, A. Jones // *Cem. Concr. Res.* – 1996. – Vol. 26. – Pp.1537–1544.
45. Khatib, J.M. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin / J.M. Khatib, J.J. Hibbert // *Constr. Build. Mater.* – 2005. – Vol. 19. – Pp. 460–472.

Отримано 14.05.2024

УДК 691.237:620.193

**Максим Геннадійович Болотов¹, Геннадій Павлович Болотов²,
Ірина Олександрівна Прибытько³, Микола Миколайович Корзаченко⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovmg@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

Scopus: [57190377278](https://orcid.org/57190377278). **Researcher ID:** [H-4183-2014](https://orcid.org/H-4183-2014)

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovgp@mail.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Researcher ID: [H-5304-2014](https://orcid.org/H-5304-2014). **Scopus:** [6506157907](https://orcid.org/6506157907)

³кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: prybytko_ira@ukr.net. **Researcher ID:** [F-7325-2014](https://orcid.org/F-7325-2014)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>. **Scopus:** [57217181853](https://orcid.org/57217181853)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>. **Scopus:** [6506157907](https://orcid.org/6506157907)

⁴кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: korzachenko_87@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>. **Researcher ID:** [F-5177-2016](https://orcid.org/F-5177-2016)

ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНІ ПРАКТИКИ ВИРОБНИЦТВА БЕТОНУ

Будівництво з використанням екологічно чистих, перероблених або біоматеріалів – це шлях до зменшення вуглецевого сліду, виснаження природних ресурсів, що так важливо для нашого добробуту та подальшого розвитку людства. Загальновідомо, що залізобетон є одним з найбільш переважних будівельних матеріалів у багатьох сферах застосування. Водночас виробництво бетону, зокрема портландцементу, вважається найбільш забруднювальним

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

процесом з величезною кількістю викидів CO₂, що призводить до деяких екологічних проблем, відомих як глобальне потепління або парниковий ефект. Наміри стати зеленими та мінімізувати проблеми, згадані вище, потребують зміни наших звичних методів виробництва бетону в бік більш орієнтованих на навколишнє середовище, відповідно, екологічно чистих.

Зусилля вчених усього світу щодо зменшення викидів CO₂ та споживання ресурсів під час виробництва бетону призвели до появи біо- та зеленого бетону. Ідея біобетону (або бетону, що самовідновлюється) спирається на концепцію біомікробії виробництва цементу через адаптацію природних елементів, моделей, шаблонів і систем для вирішення проблем людини. Таким чином, було встановлено потенціал оточуючого мікробіому (мікробів і мікробів) для самовідновлення бетону, зокрема, для відтворення CaCO₃, коли починають наростати тріщини.

Ідея зеленого бетону зовсім інша і в основному базується на заміні звичайного портландиту іншим додатковим цементуючим матеріалом, таким як мелений гранульований доменний шлак, летуча зола або пуцолановий матеріал, відомий як кремнезем, а також метаколін.

Ця стаття містить вичерпний огляд впливу стійких, екологічно орієнтованих будівельних матеріалів для виробництва бетону на його механічні властивості. Показано, що застосування доменного шлаку, летучої золи, кремнезему або метаколіну як часткової заміни звичайного портландцементу при виготовленні бетону покращує його механічні властивості, зокрема міцність на стиск, розтяг і згин.

Ключові слова: стійкість; виробництво бетону; біомікробія; біобетон; самовідновлювальний бетон; зелений бетон.
Рис.: 7. Табл.: 8. Бібл.: 45.

**Віктор Григорович Каранда¹, Андрій Михайлович Єрошенко²,
Дмитро Володимирович Кальченко³**

¹аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: karanda19@ukr.net

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: yeroshenkoam@stu.cn.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516>, **ResearcherID:** [G-6757-2014](https://pubs.rsos.royalsocietypublishing.org/author/G-6757-2014)

³кандидат технічних наук, викладач кафедри кібербезпеки та математичного моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).

E-mail: itmia@ukr.net, **Scopus Author ID:** [56939026500](https://orcid.org/56939026500)

ЧАСОВІ ЗВ'ЯЗКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЕРЕВООБРОБНИХ ТА МЕБЛЕВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Деревообробне та меблеве виробництво є вагомим компонентом економіки України. Ці галузі не тільки сприяють забезпеченню внутрішніх потреб у меблях та виробих із деревини, але й відіграють значну роль в експорті.

Успішне функціонування деревообробних та меблевих підприємств багато в чому залежить від максимальної інтенсифікації виробництва. Оскільки вони є тісно пов'язаними, важливо розуміти часові зв'язки, що діють під час перебігу технологічних процесів для ефективного планування та оптимізації виробничих процесів. У цій статті досліджуються основні аспекти часових зв'язків деревообробних та меблевих виробництв, аналізуючи їх взаємозалежності, виклики та стратегії оптимізації.

Ключові слова: часові зв'язки; технологічні процеси деревообробних та меблевих виробництв; часовий аналіз.

Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Актуальність аналізу часових зв'язків у меблевому виробництві полягає в багатьох ключових аспектів, що відображають сучасні тенденції та вимоги галузі. У сучасному світі, де конкуренція в меблевій галузі є дуже високою, ефективність виробництва відіграє ключову роль у забезпеченні конкурентоспроможності підприємств. Аналіз часових зв'язків допомагає ідентифікувати проблемні або неефективні ділянки виробничого процесу та шукати шляхи їх оптимізації. Оптимізація часових зв'язків дає змогу підвищити продуктивність виробництва, скоротити час, потрібний для виготовлення продукції, і зменшити загальні витрати на виробництво. Час є важливим ресурсом, і зменшення часових затрат на різних етапах виробництва дозволяє економити кошти на оплату праці, матеріали тощо.

Сучасні споживачі дедалі більше цінують швидкість постачання та індивідуалізацію продукції. Аналіз часових зв'язків допомагає деревообробним та меблевим підприємствам відповідати цим вимогам, шляхом покращення ефективності та гнучкості виробничих процесів.

Аналіз часових зв'язків також стає важливим при впровадженні новітніх технологій, таких як автоматизація та штучний інтелект. Це дозволяє оптимізувати використання таких технологій та максимально використовувати їхній потенціал у збільшенні продуктивності та якості продукції.

Отже, аналіз часових зв'язків у деревообробному та меблевому виробництві є необхідним для досягнення ефективності, зниження витрат, відповіді на вимоги ринку та впровадження новітніх технологій. Він дозволяє підприємствам пристосовуватися до бізнес-середовища, що швидко змінюється, та забезпечує їхню конкурентоспроможність на ринку.

Постановка проблеми. Оптимізація часових зв'язків може бути здійснена шляхом створення і використання нормативної бази часового аналізу, що ґрунтується на основних положеннях стандартів ДСТУ EN ISO 9001:2018 [2]. Однак сучасна нормативна документація встановлює порядок розрахунків часових зв'язків технологічного процесу без врахування їхнього імовірнісного характеру, що унеможливорює адекватність результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для сучасних технологічних процесів деревообробних та меблевих виробництв характерні складність і новизна об'єктів нової техніки й пов'язане з цим збільшення обсягів робіт при виготовленні виробів і часу їх виконання; удосконалення технічних параметрів виробів; підвищення вимог до якості виробів; швидке моральне старіння об'єктів виробництва [1].

Необхідність розширення масштабів виробництва, ускладнення рівня проведених заходів, координація діяльності великих колективів людей істотно ускладнили функції управління технологічними процесами. Сталість і передбачуваність системи часових зв'язків дозволяє значно спростити таке управління.

На цьому етапі розвитку виробництва в Україні доводиться ухвалювати рішення, які часто пов'язані з великими матеріальними витратами. Ухвалені рішення завжди спрямовані на досягнення деяких цілей і реалізуються в межах деякої системи обмежень, що зумовлені конкретними обставинами проведення заходу.

Здебільшого ті самі цілі можуть бути досягнуті різноманітним чином, із різноманітними витратами часу та матеріальних ресурсів. Вибрати найбільше економічний і доцільний технологічний процес, ухвалити обґрунтоване, оптимальне рішення – далеко не просте завдання і для свого рішення потребує застосування сучасних наукових методів. Розв'язання такої задачі неможливо без оптимізації системи часових зв'язків, які у виробничому процесі проявляються у трьох сферах:

1. Прогнозування розвитку виробництва.
2. Планування технологічного і виробничого процесів.
3. Нормування технологічного процесу.

Ці сфери відбивають різноманітні рівні виробництва й мають ієрархічну структуру.

Прогнозування розвитку виробництва є результатом дослідження ринку, основних тенденцій, що діють у суспільстві й техніці. Таким чином, прогнозування відбиває перспективи розвитку підприємства й визначає якість і кількість нових розробок, є довгостроковим плануванням.

Поточне й оперативно-календарне планування визначають етапи розв'язання задач, що поставлені довгостроковим плануванням, і регламентують поведінку підприємства та його підрозділів на етапі виробництва конкретних виробів.

Прогнозування і планування направлені в майбутнє. Якщо прогнозування визначає, що результати, мабуть, будуть досягнуті, то планування встановлює, які рішення повинні бути ухвалені, щоб досягти в найближчій перспективі необхідних результатів.

Нормування ж, у свою чергу, є підсистемою планування і визначає роботу конкретного виконавця в кожному технологічному процесі [3].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Для забезпечення максимального ефекту від оптимізації часових зв'язків необхідно оптимізувати всі їх прояви у виробництві, тобто новий методологічний апарат повинний мати можливість використання на всіх рівнях системи часових зв'язків. Такий підхід дозволить забезпечити комплексність оптимізації та зберегти взаємозв'язок усіх проявів часових зв'язків у виробництві.

Перш ніж розпочинати створення такої методики, необхідно вивчити методи, що вже знайшли своє застосування в системах розрахунку часових зв'язків, з метою їх аналізу й можливого використання в новій методиці. Головним чином, необхідно дослідити як існуючі методи враховують імовірнісний характер часових зв'язків.

У зв'язку з тим, що метою дисертаційної роботи є оптимізація технологічного процесу, основна увага буде звернена на методи розрахунку часових зв'язків при оперативно-календарному плануванні та нормуванні часу. Для перспективного та поточного планування буде зроблений загальний огляд, з метою ознайомлення з підходами до часових зв'язків на відповідному рівні виробничого процесу.

Метою статті є обґрунтування підвищення гнучкості та стабільності технологічних процесів деревообробних та меблевих виробництв шляхом впровадження розрахунків за методикою оптимізації часових зв'язків технологічних процесів.

Виклад основного матеріалу. Успішне функціонування деревообробних та меблевих підприємств багато в чому залежить від максимальної інтенсифікації виробництва. У виробничому процесі діють п'ять видів зв'язків: розмірні, часові, інформаційні, економічні та зв'язки властивостей матеріалів [1]. Інтенсивний розвиток виробництва потребує оптимізації технологічних і виробничого процесів, етапами якої є оптимізація всіх зв'язків виробництва.

Оптимізація часових зв'язків може бути здійснена шляхом створення і використання нормативної бази часового аналізу, що ґрунтується на основних положеннях стандартів ДСТУ EN ISO 9001:2018 [2]. Однак сучасна нормативна документація встановлює порядок розрахунків часових зв'язків технологічного процесу без урахування їх імовірнісного характеру, що унеможливорює адекватність результатів.

Час і простір є основними формами існування матерії. Природознавство XVIII-XIX століть, приймаючи об'єктивність часу і простору, розглядало їх у відриві одне від одного. Ці два поняття приймалися як щось самостійне й існуюче цілком незалежно від матерії та руху, але сучасна наука вважає що матерію, рух, час і простір треба вивчати комплексно. Час не існує сам по собі, у відриві від матерії, а знаходиться в такому універсальному взаємозв'язку, в якому воно втрачає самостійність і виступає як сторона єдиного різноманітного цілого. Цю світоглядну модель можна і треба застосувати до виробництва, що є відбитком матеріального світу в якому діють його закони [2].

Існування та взаємодія п'яти видів зв'язків виробничого процесу зумовлюють його цілісність як системи. Для зберігання єдності системи, при оптимізації технологічного і виробничого процесів повинен здійснюватися комплексний підхід на нормативній основі. Створення комплексної моделі виробництва неможливе без глибокого аналізу всіх зв'язків. Етап декомпозиції системи зв'язків виробничого процесу проходив паралельно з розробкою аналізів окремих видів зв'язків. Розроблено широку нормативну базу для розмірного аналізу й аналізу властивостей матеріалів [4; 5]. Останнім часом активно вивчаються та моделюються інформаційні й економічні зв'язки. Аналіз інформаційних зв'язків став на новий рівень з розвитком інформаційних технологій, а перехід економіки до ринкових відносин призвів до створення нового економічного аналізу. Цим же зумовлена необхідність створення нормативного забезпечення принципово нового аналізу часових зв'язків.

Часовий аналіз має універсальний характер, тобто за допомогою його методологічного і математичного апаратів можна проводити оптимізацію не тільки системи часових зв'язків технологічного процесу, але нормувати та планувати виробничий процес в цілому [6; 7]. Така побудова часового аналізу дозволяє використовувати його не тільки для деревообробних та меблевих технологічних процесів, але й виконати його адаптацію до інших галузей промисловості. Цей аспект дає можливість уніфікувати та стандартизувати промислове виробництво в часі.

Часовий аналіз у сукупності з аналізами інших зв'язків виробничого процесу дає можливість створення єдиного комплексного аналізу, на основі якого можна моделювати й оптимізувати виробництво.

Стохастичний характер перебігу технологічного процесу стає основною передумовою при створенні нормативної бази аналізу часових зв'язків. Імовірнісний розрахунок дозволяє директивно регламентувати часові зв'язки технологічних процесів, що робить виробничий процес більш стабільним і призводить до зменшення часу простою устаткування та пролежування деталей. Оптимізація часових зв'язків не усуває організаційні

зриви технологічного процесу, але дозволяє простежити їх причини та врахувати ризики їх появи. Оцінивши можливість прояву різноманітних збоїв у ході процесу й визначивши ступінь їхнього впливу на коливання часу виконання робіт, часовий аналіз дає змогу призначити допуски на норми часу. Таким чином, з'являється можливість згладити усі "нерівності" перебігу виробничого процесу і зробити планування та нормування більш гнучким і адекватним. Такий підхід до часових зв'язків прирівнює їх до матеріальних ресурсів виробництва та робить їх об'єктом планування.

Основою методики аналізу часових зв'язків повинна стати нормативна база розмірного аналізу, оскільки вони подібні до розмірних. Таким чином, стає питання можливості адаптації математичного апарату розмірного аналізу для використання його в розрахунках часових зв'язків. Найбільш адекватним, на нашу думку, є застосування імовірнісного способу розрахунку, який найточніше відповідає часовій оптимізації технологічного процесу.

В умовах планової економіки час розглядався головним чином з погляду організації виробництва. Детермінований підхід до системи часових зв'язків відбивав наявний стан економіки, яка розглядалася як стабільний і легко планований об'єкт. Не враховувалося те, що виробничий процес є відбитком матеріального світу і його складовою частиною і тому його протікання має стохастичний характер.

Щоб підпорядкувати імовірнісний виробничий процес плановій економіці укрупнювалися норми часу та створювалися заділи, як матеріальні, так і часові. Це призводило до збільшень термінів виробництва і найчастіше нова продукція доходила до споживача вже морально застарілою.

У ринкових умовах час розглядається не просто як інструмент організації виробництва, а як економічна категорія. Економіка в першу чергу потребує саме часової оптимізації. Термін виготовлення продукції стає поряд з її якістю, не тільки тому, що вони спільно визначають вартість виробу. Якщо якість продукції визначає нішу товару в споживчому ринку, то час його виробництва визначає, чи встигне товар зайняти цю нішу чи ні.

Оптимізація часових зв'язків призводить до скорочення часу пролежування деталей і простою устаткування, зменшує матеріальні та часові заділи, що дає можливість збільшити швидкість обігу фондів і тим самим буде сприяє вирішенню однієї з основних проблем сучасного вітчизняного виробництва – проблему обігових фондів.

Параметрична оптимізація технологічного процесу, при якій нормуються часові зв'язки, приймає особливе значення при автоматизації виробництва. Основою сучасного виробництва стають ГВС. Гнучкі комплекси коштовні, тому тільки максимальне їх завантаження дозволяє отримати необхідну віддачу. Таке завантаження устаткування можна одержати лише при жорсткій регламентації руху предметів праці в часі.

В автоматизованому виробництві, як не де більш, виявляється організаційна сторона часових зв'язків. Від такту автоматичної лінії до часу лімітуючої операції ГВС, кожна норма часу повинна бути перерахована й оброблена, тому що з огляду на серійність виробництва вона призводить до збільшення термінів випуску продукції та її собівартості.

Тому створення нормативного забезпечення, яке регламентує часові зв'язки, є актуальною задачею стандартизації та сертифікації і являє собою беззаперечний науковий та практичний інтерес.

На основі вищевикладеного, впливають наступні задачі, які потрібно розв'язати при створенні нормативної бази часового аналізу:

1. Дослідити можливість застосування нормативної бази розмірного аналізу для розрахунку часових зв'язків технологічного процесу;
2. Розробити метод часового аналізу шляхом адаптування засобів розрахунку розмірних ланцюгів до оптимізації часових ланцюгів;

3. Дослідити статистичні характеристики ланок часових ланцюгів, з метою встановлення нормативних показників методики;

4. Розробити методику розрахунку часових ланцюгів для різних видів поєднання операцій технологічного процесу;

5. На основі отриманих аналітичних залежностей і статистичних даних визначити принципи створення нормативної документації, яка регламентує порядок призначення допусків на норми часу;

6. Розробити алгоритмічне та математичне забезпечення нормативної документації і довести його до рівня використання у виробничій практиці.

В якості теоретичної і методологічної основи розв'язання поставлених задач повинні використовуватися фундаментальні положення стандартизації, сертифікації, теорії розмірного аналізу, теорія розкладів, теорія систем сіткового планування і управління, роботи вітчизняних і закордонних учених із проблем оптимізації часових зв'язків технологічного процесу.

Висновки. На основі аналізу існуючих методик оптимізації часових зв'язків виробничих і технологічних процесів деревообробних та меблевих виробництв була сформульована мета роботи — обґрунтування підвищення гнучкості та стабільності технологічного процесу шляхом впровадження розрахунків за методом оптимізації часових зв'язків технологічних процесів. Досягнути поставленої мети можна шляхом дослідження можливості застосування методу розмірного аналізу для оптимізації системи часових зв'язків технологічного процесу; створення методу часового аналізу шляхом адаптування засобів розрахунків розмірних ланцюгів до оптимізації часових ланцюгів; дослідження статистичних характеристик ланок часових ланцюгів; створення методики розрахунку часових ланцюгів для різних видів поєднання операцій технологічного процесу; представлення часового аналізу у вигляді єдиного комплексу, призначеного для оптимізації технологічних процесів, який є підсистемою САПР ТП.

Список використаних джерел

1. Бойко, С. В. Підготовка виробництва меблевих фасадів за допомогою сучасних САМ-систем / С. В. Бойко, А. М. Єрошенко, П. Л. Ігнатенко // Технічні науки та технології. – 2018. – № 1 (11). – С. 159-167. DOI: 10.25140/2411-5363-2018-1(1)-159-167.

2. Єрошенко, А. М. Особливості сертифікації продукції деревооброблювального виробництва / А. М. Єрошенко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія: Технічні науки – Чернігів: ЧНТУ, 2011. – №4 (53). – С. 257-261.

3. Підвищення надійності роботи складальних систем шляхом оптимізації часових технологічних ланцюгів : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Коноплянченко Євген Владиславович ; Національний технічний ун-т "Харківський політехнічний ін-т". – Харків, 2001. – 20 с.

4. Properties of Hornbeam (*cerpinus betulus*) wood thermally treated under different conditions / O. Pinchevska, J. Sedliacik, O. Horbachova, A. Spirochkin, I. Rohovskyi // Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen. – 2019. – Vol.61. No.2. – P. 25-39. DOI:10.17423/afx.2019.61.2.03.

5. Pinchevska, O. Wood particleboard covered with slices made of pine tree branches / O. Pinchevska, M. Šmidriakova // Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen. – 2016. – Vol. 8, No.1. – Pp. 67-74. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-141-149](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-141-149).

6. Development and research of thermoplastic methods for hardening details / V.V. Kalchenko, A. M. Yeroshenko, S. V. Boyko, P. L. Ignatenko // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2020. – № 2. – P. 53-60. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/053>.

7. Єрошенко, А. М. Дослідження фізико-механічних властивостей деревинних композиційних матеріалів / А. М. Єрошенко, С. В. Бойко // Технічні науки та технології. – 2016. – № 2 (4). – С. 199-204.

References

1. Boiko, S. V., Yeroshenko A. M., Ihnatenko P. L. (2018). Pidhotovka vyrobnytstva meblevykh fasadiv za dopomohoiu suchasnykh CAM-system. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 1(11), 159-167.

2. Yeroshenko, A.M. (2011). Osoblyvosti sertyfikatsii produktii derevoobrobliuvalnogo vyrobnytstva. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, 4(53), 257-261.
3. Konoplianchenko, Ye.V. (2001). Pidvyshchennia nadiinosti roboty skladalnykh system shliakhom optymizatsii chasovykh tekhnolohichnykh lantsiuhiv. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv: NTU «KhPI».
4. Pinchevska, O., Sedliacik, J., Horbachova, O., Spirochkin, A., Rohovskyi, I. (2019). Properties of Hornbeam (*cerpinus betulus*) wood thermally treated under different conditions. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 61(2), 25-39. DOI: 10.17423/afx.2019.61.2.03
5. Pinchevska, O., Šmidriakova, M. (2016). Wood particleboard covered with slices made of pine tree branches. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 8(1), 67–74. DOI: 10.17423/afx.2016.58.1.08
6. Kalchenko, V.V., Yeroshenko, A.M., Boyko, S.V., Ignatenko, P.L. (2020). Development and research of thermoplastic methods for hardening details. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020(2), 53–60.
7. Yeroshenko, A.M., Boiko, S.V. (2016). Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei derevynnykh kompozytsiinykh materialiv. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 2(4), 199-204.

Отримано 14.05.2024

UDC 684.4:674.5

Viktor Karanda¹, Andriy Yeroshenko², Dmytro Kalchenko³¹Doctoral Graduate (PhD)

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: karanda19@ukr.net²PhD in Technical Sciences,Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Woodworking Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)**E-mail:** yeroshenkoam@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516> **ResearcherID:** [G-6757-2014](https://pubs.rsos.royalsocietypublishing.org/author/G-6757-2014)³PhD in Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).**E-mail:** itmia@ukr.net **Scopus Author ID:** [56939026500](https://orcid.org/56939026500)

TEMPORAL RELATIONSHIPS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF WOODWORKING AND FURNITURE ENTERPRISES

Woodworking and furniture production is an important component of the economy of Ukraine. These industries not only contribute to domestic demand for furniture and wood products, but also play a significant role in exports. The successful functioning of woodworking and furniture enterprises largely depends on the maximum intensification of production. There are five types of connections in the production process: size, time, information, economic and material property connections. The intensive development of production requires the optimization of technological and production processes, the stages of which are the optimization of all production links. Optimization of time connections can be carried out by creating and using a regulatory framework for time analysis based on the main provisions of the DSTU EN ISO 9001:2018 standards. However, modern regulatory documentation establishes the procedure for calculating time connections of the technological process without taking into account their probabilistic nature, which makes the adequacy of the results impossible. Since they are closely related, it is important to understand the temporal relationships that operate during the course of technological processes for effective planning and optimization of production processes. In this report, we will consider the main aspects of time relations of woodworking and furniture production, analyzing their interdependencies, challenges and optimization strategies. An analysis of the temporal relationships of woodworking and furniture production reveals the importance of careful planning and coordination at each stage of the production chain. As technology advances and global competition increases, effective management of these relationships is becoming a key success factor in the woodworking and furniture industry.

Key words: temporal relationships; technological processes of woodworking and furniture industries; time analysis.**References:** 7.

**Сергій Францевич Сабол¹, Ольга Віталіївна Холявік², Юрій Петрович Бородій³,
Павло Юрійович Проценко⁴, Валерій Володимирович Піманов⁵,
Георгій Русланович Компанієць⁶**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: sabol1@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8585-508X>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: o.holiavik@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6539-4467>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: borodiyuriy@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8050-0379>

⁴кандидат технічних наук, старший викладач кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: pavloprocenko64@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9390-0718>

⁵кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: pimanov@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6609-6904>

⁶студент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: gora272002@gmail.com

ВПЛИВ ТИСКУ РІДИНИ НА ТЕХНОЛОГІЧНУ ПЛАСТИЧНІСТЬ МЕТАЛУ ПРИ ПРЯМОМУ ГІДРОМЕХАНІЧНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ

У роботі представлено результати проведення чисельних експериментів з моделювання процесу холодного гідромеханічного видавлювання методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу Deform, з метою визначення впливу основних параметрів видавлювання (тиск рідини, ступінь деформації, граничні умови) на напружено-деформований стан (НДС) заготовки, зусилля гідромеханічного видавлювання та ступінь використання ресурсу пластичності. Визначено оптимальне значення параметрів процесу з погляду забезпечення максимальної величини технологічної пластичності деталей при гідромеханічному видавлюванні.

Ключові слова: гідромеханічне видавлювання; моделювання; метод скінчених елементів; напружено-деформований стан; критерій руйнування; коефіцієнт використання; ступінь деформації; зусилля.

Рис.: 13. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Одним із передових методів удосконалення існуючої технології обробки металів тиском у холодному стані є застосування холодного пластичного гідропресування металів. Під час цього процесу, який проводиться при високому (1-2 ГПа) гідростатичному тиску, накладеному на осередок пластичної деформації заготовки, інструментальні сталі піддаються значним разовим деформаціям, які ефективно впливають на їхню структуру та фізико-механічні характеристики.

Ці деформації, у поєднанні з термомеханічною обробкою, відкривають нові можливості для підвищення стійкості різальних і штампувальних інструментів. Наприклад, фрези, свердла, мітчики, пуансони та розгортки, виготовлені методом холодного гідромеханічного видавлювання, демонструють стійкість у 4 рази вище, ніж інструменти, створені за традиційною технологією. Застосування холодного гідромеханічного видавлювання також дозволяє зменшити витрати на швидкорізальні сталі та значно підвищити продуктивність праці [1-5].

Цей процес також дозволяє зменшити зусилля, необхідне для виконання процесу холодного видавлювання, оскільки зменшується площа контакту інструменту й заготовки [6].

На сьогодні є роботи [7-11], у яких автори досліджують вплив процесу гідромеханічного видавлювання на мікроструктуру матеріалу. Визначаються оптимальні величини ступенів пластичної деформації заготовки для отримання необхідної мікроструктури матеріалу. При цьому досить мало інформації про те, як величина тиску рідини впливає на протікання цього процесу.

Постановка проблеми. Визначення оптимальних параметрів гідромеханічного видавлювання – тиску рідини, зусилля процесу, ступеня деформації необхідне для розробки ефективної технології виготовлення різальних і штампувальних інструментів на базі вказаного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пряме гідромеханічне видавлювання металів вже майже 100 років використовується для отримання різних металевих виробів, особливо тих, у яких необхідно отримати мікрозернисту мікроструктуру для досягнення високої міцності виробу [7].

При гідромеханічному видавлюванні за рахунок надвисокого всебічного тиску відбувається замикання мікрodefektів структури екструдованого матеріалу і його пластичність різко підвищується. За рахунок цього з'являється можливість отримувати профілі складної форми з малопластичних та крихких матеріалів, які не можна було обробляти видавлюванням жорстким пуансоном. Крім того, за рахунок деформації в умовах високого всебічного тиску покращується структура металів і сплавів, що обробляються [2].

Зміни мікроструктури обробленого матеріалу та відповідні зміни його властивостей залежать від параметрів процесу прямого гідромеханічного видавлювання, таких як, величина деформації та температура процесу, а також початковий стан поверхні матеріалу та вид використовуваного мастила. Правильним вибором параметрів процесу гідромеханічного видавлювання можна виконати його оптимізацію та модифікувати кінцеву структуру оброблюваного матеріалу для отримання бажаного кінцевого ефекту. Так, в роботах [7-8], розглянуто процес видавлювання заготовок із титанового сплаву ($Ti > 99,7\%$), встановлена оптимальна температура процесу – більш як $400\text{ }^\circ\text{C}$ [8], при якій процес протікає з достатнім запасом пластичності матеріалу та без суттєвих змін механічних властивостей матеріалу отриманої заготовки.

У роботі [9] розглянуто процес гідромеханічного видавлювання нержавіючої сталі 316L, вивчалася мікроструктура сталі та стан оксидної плівки, що захищає матеріал від корозії.

Сьогодні гідромеханічне видавлювання застосовується для отримання виробів із добре опрацьованою структурою зерна, орієнтованою по осі заготовки, що у ряді застосувань помітно покращує експлуатаційні властивості деталі. При цьому якість поверхні готового виробу відповідає шліфуванню [2].

Умови тертя, близькі до рідинного, різко знижують зношування матриць, забезпечуючи високу якість поверхні та точність виробу після видавлювання, що дозволяє виключити операцію калібрування [2; 12-13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Нині недостатньо повно досліджено закономірності, особливості протікання та реалізації процесу гідромеханічного видавлювання як такого, що характеризується більшою стабільністю, ніж процес гідравлічного видавлювання [14-15].

Мета дослідження (статті). Підвищення ефективності процесів гідромеханічного видавлювання осесиметричних деталей шляхом визначення оптимальних параметрів процесу та розширення номенклатури осесиметричних виробів, які отримуються холодною пластичною формозміною.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 представлено розрахункові схеми процесу гідромеханічного видавлювання для деформування зі ступенями деформації 28,7 та 55,55 %.

Чисельні експерименти процесу гідромеханічного видавлювання проводяться з урахуванням тиску рідини, величина якого вибиралась з урахування межі текучості матеріалу заготовки. Межа текучості для матеріалу ШХ 15 σ_s становить 410 МПа.

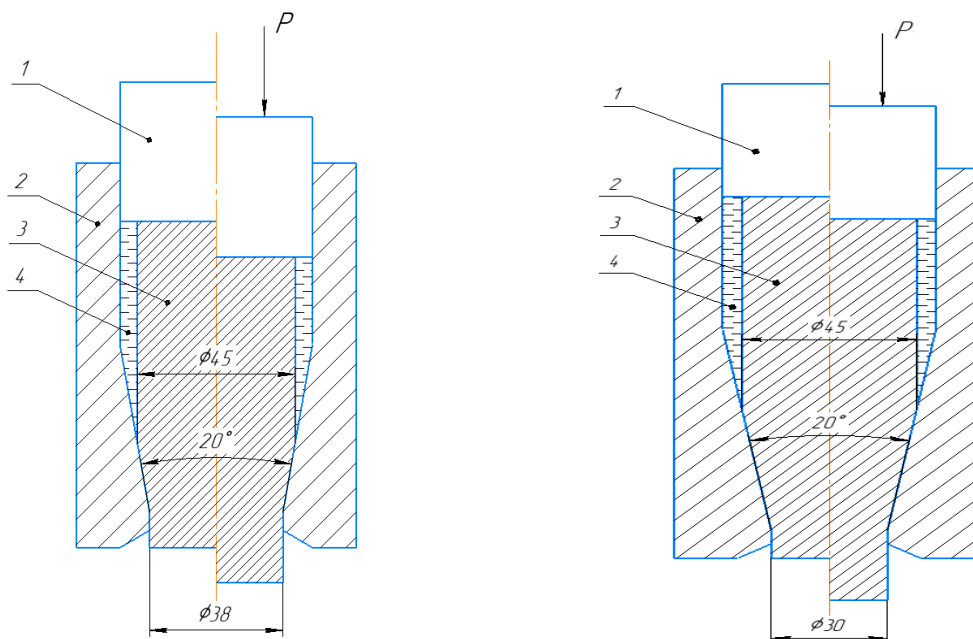


Рис. 1. Схема прямого видавлювання з протитиском рідини:
1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – заготовка; 4 – рідина

Відповідно, величина тиску приймалася для трьох варіантів чисельного експерименту така:

$$P = 0,3 \cdot \sigma_s = 123 \text{ МПа};$$

$$P = 0,5 \cdot \sigma_s = 205 \text{ МПа};$$

$$P = 0,8 \cdot \sigma_s = 328 \text{ МПа}.$$

За допомогою програмного комплексу DEFORM 2D проведено моделювання процесу гідромеханічного видавлювання з вихідними даними:

- коефіцієнт тертя $\mu = 0,07$ (за Зібелем);
- швидкість переміщення інструменту 2 мм/с;
- матеріал DIN-100г6 аналог сталі ШХ15;
- кількість скінченних елементів сітки 1500;

У результаті проведення чисельного експерименту процесу гідромеханічного видавлювання зі ступенем деформації 28,69 % та тиском рідини 123 МПа отримано графік залежності зусилля процесу від переміщення пуансона (рис. 2). Максимальне зусилля, яке діє на пуансон під час гідромеханічного видавлювання, становить 651,2 кН.

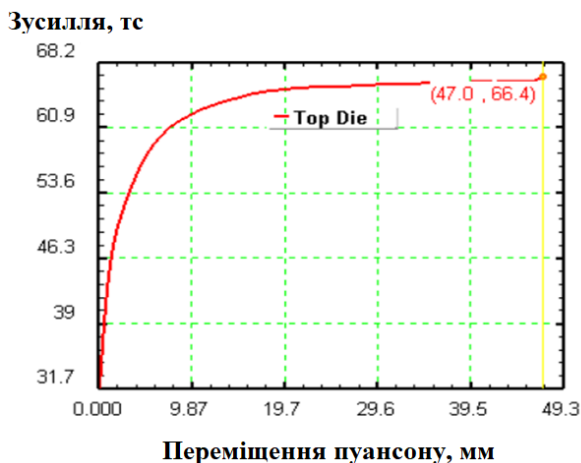


Рис. 2. Графік зусилля-переміщення при деформуванні

Розподіл параметрів напружено-деформованого стану (НДС) заготовки в процесі гідромеханічного видавлювання для вказаних вище параметрів наведено на рис. 3.

Значення інтенсивності деформації для гідромеханічного видавлювання знаходиться в діапазоні 0,121–0,424 (рис. 3, б). Ступінь використання ресурсу пластичності досягає 0,0951 (рис. 3, а), що забезпечує отримання якісного виробу. Значення нормального тиску на інструмент діє на торці пуансона та на конусі матриці становили 2530 МПа (рис. 3, г).

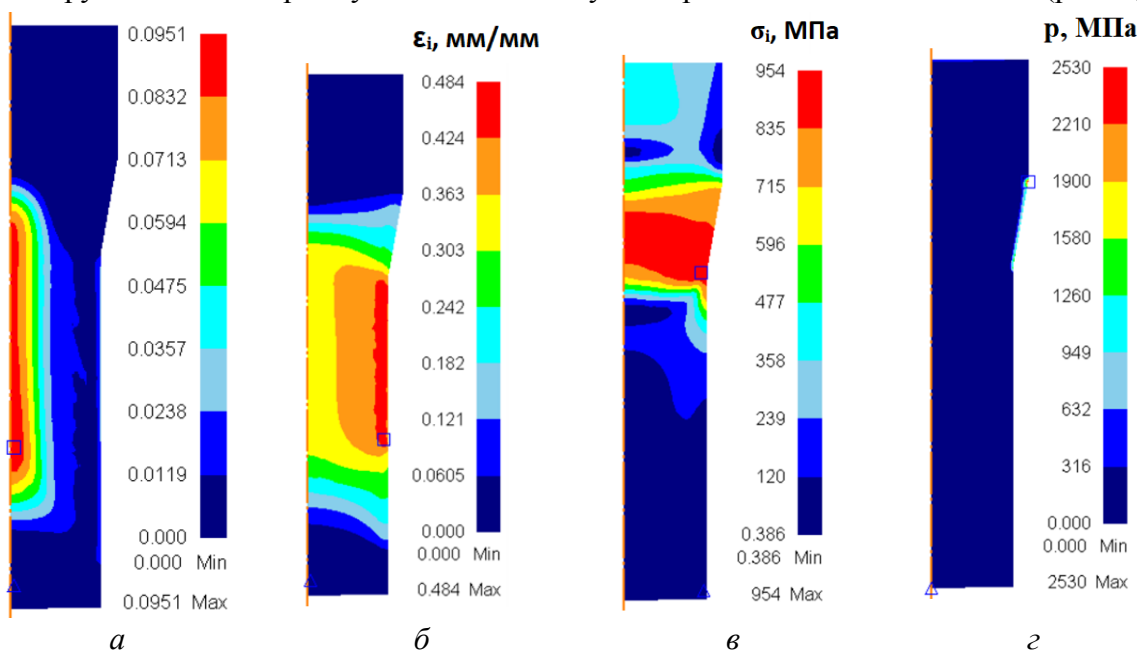


Рис. 3. Розподіл параметрів НДС:

а – ступінь використання ресурсу пластичності; б – інтенсивність деформації;
в – інтенсивність напружень; г – нормальний тиск на поверхні інструменту

Результати моделювання процесу гідромеханічного видавлювання з тиском рідини 205 МПа приведено нижче.

Максимальне зусилля яке діє на пуансон досягає 635,5 кН (рис. 4).

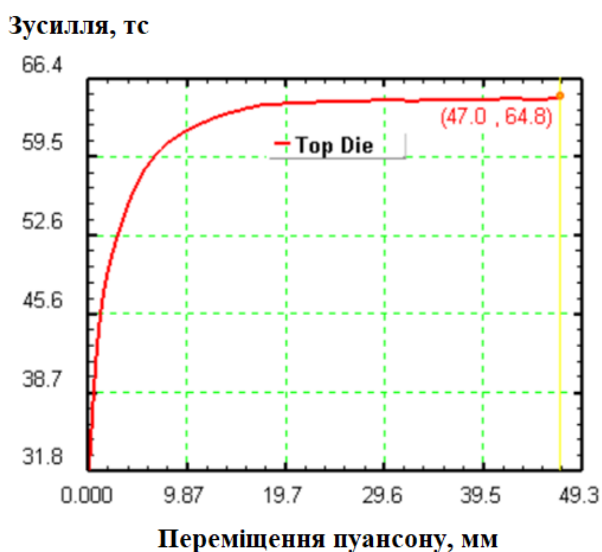


Рис. 4. Графік зусилля-переміщення при деформуванні

На (рис. 5) наведено отримані результати моделювання процесу гідромеханічного видавлювання.

Значення інтенсивності деформації гідромеханічного видавлювання знаходяться в діапазоні 0,120–0,419 (рис. 5, б). Ступінь використання ресурсу пластичності досягає 0,0960 (рис. 5, а), що не є критичним за даної схеми деформування. Значення нормального тиску на інструмент діє на торці пуансона та на конусі матриці, ці значення склали 2460 МПа (рис. 5, з).

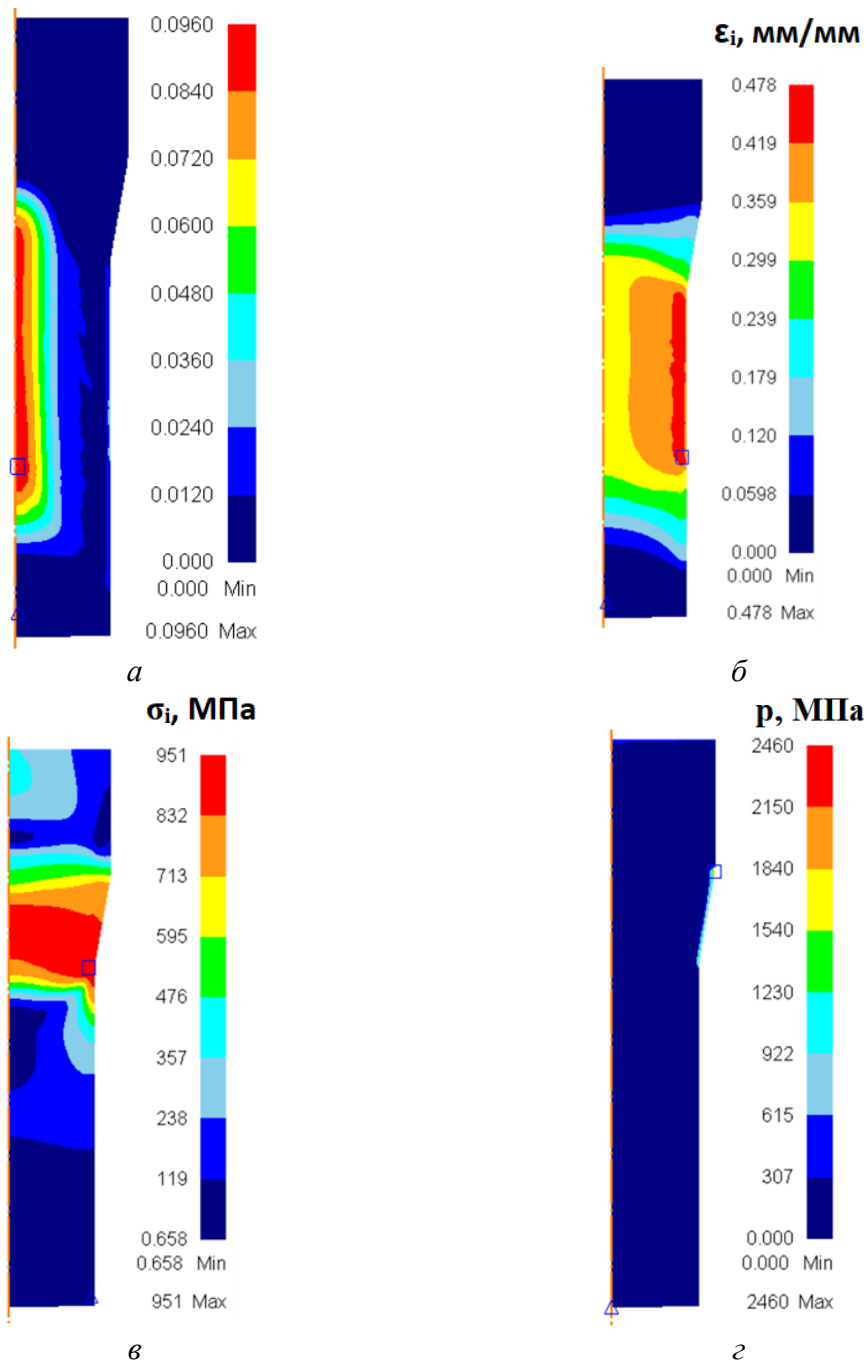


Рис. 5. Розподіл параметрів НДС:

а – ступінь використання ресурсу пластичності; б – інтенсивність деформації;
в – інтенсивність напружень; з – нормальний тиск на поверхні інструменту

Зусилля, яке діє на пуансон під час гідромеханічного видавлювання, досягає 611,9 кН, графік (рис. 6) зусилля-переміщення при деформуванні з тиском рідини 328 МПа.

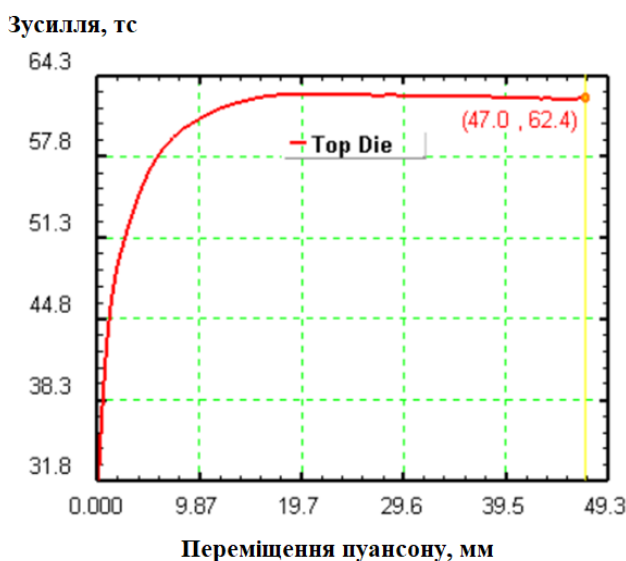


Рис. 6. Графік зусилля-переміщення при деформуванні

На (рис. 7-8) наведено отримані результати процесу гідромеханічного видавлювання.

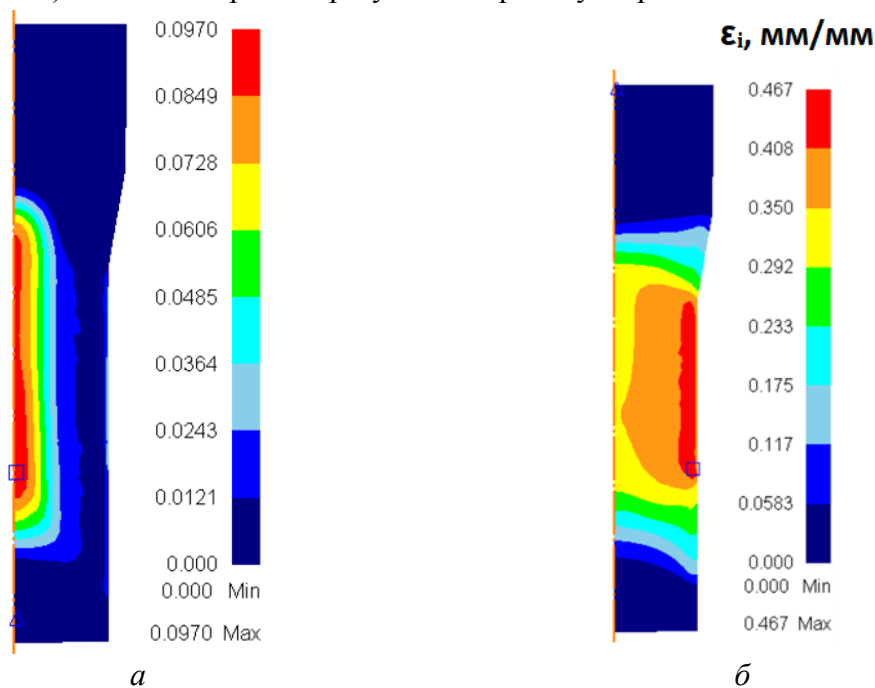


Рис. 7. Розподіл параметрів:

а – ступінь використання ресурсу пластичності; б – інтенсивність деформації

Результати моделювання показали, що значення інтенсивності деформації для гідромеханічного видавлювання знаходилось в діапазоні 0,117–0,408 (рис. 7, б). Ступінь використання ресурсу пластичності досягає 0,0970 (рис. 7, а), що не є критичним за даної схеми деформування. Значення нормального тиску на інструмент що діє на торці пуан-

сона та на конусі матриці, ці значення складо 2760 МПа (рис. 8, б). Такі результати можуть бути критичними для більшості штампових сталей та можуть призвести до руйнування робочого інструменту.

Результати моделювання процесу гідромеханічного видавлювання зі ступенем деформації 55,55 % та протитиском рідини 123 МПа наведено нижче.

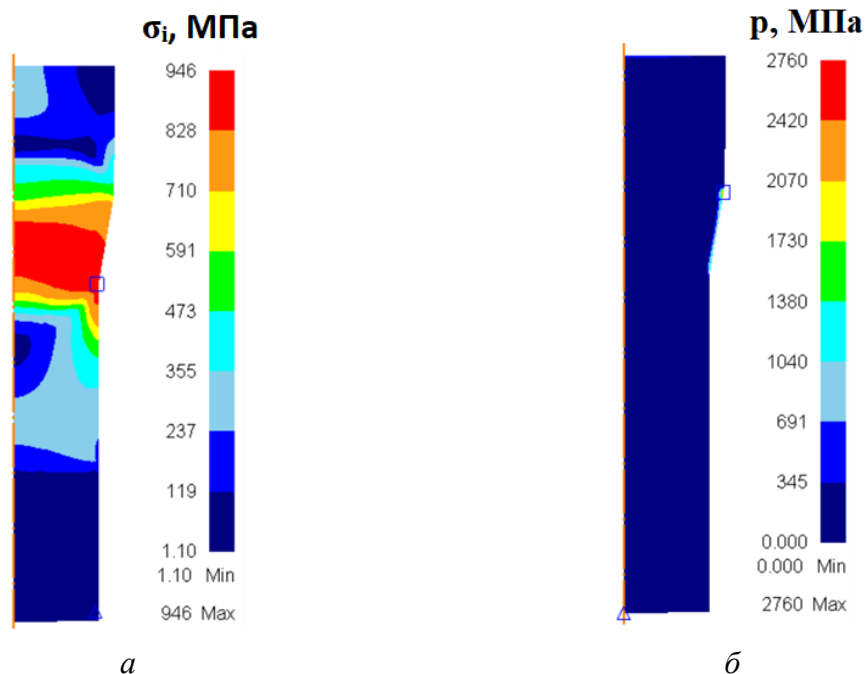


Рис. 8. Розподіл параметрів:

a – інтенсивність напружень; *б* – нормальний тиск на поверхні інструменту

Зусилля, яке діє на пуансон під час гідромеханічного видавлювання, досягає 3501 кН, графік (рис. 9) зусилля-переміщення при деформуванні.

Зусилля, тс

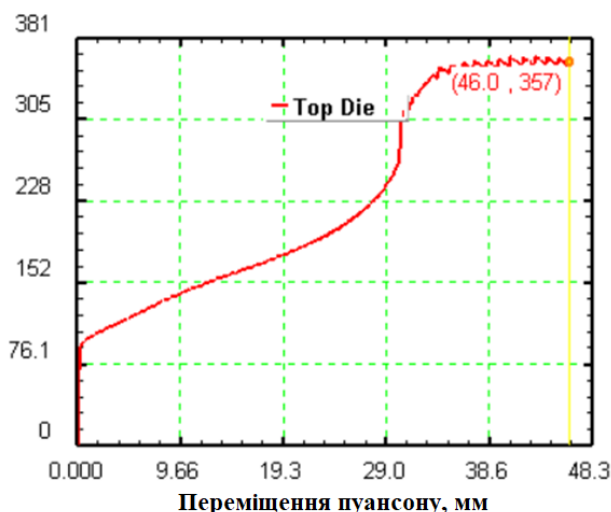


Рис. 9. Графік зусилля-переміщення при деформуванні

На (рис. 10) наведено отримані результати моделювання процесу гідромеханічного видавлювання.

Значення інтенсивності деформації знаходилися в діапазоні 0,708–0,944 (рис. 10, б). Ступінь використання ресурсу пластичності досягає 0,0331 (рис. 10, а), що не є критичним за даної схеми деформування. Значення нормального тиску на інструмент діє на торці пуансона та на конусі матриці, ці значення становило 2150 МПа (рис. 10, г).

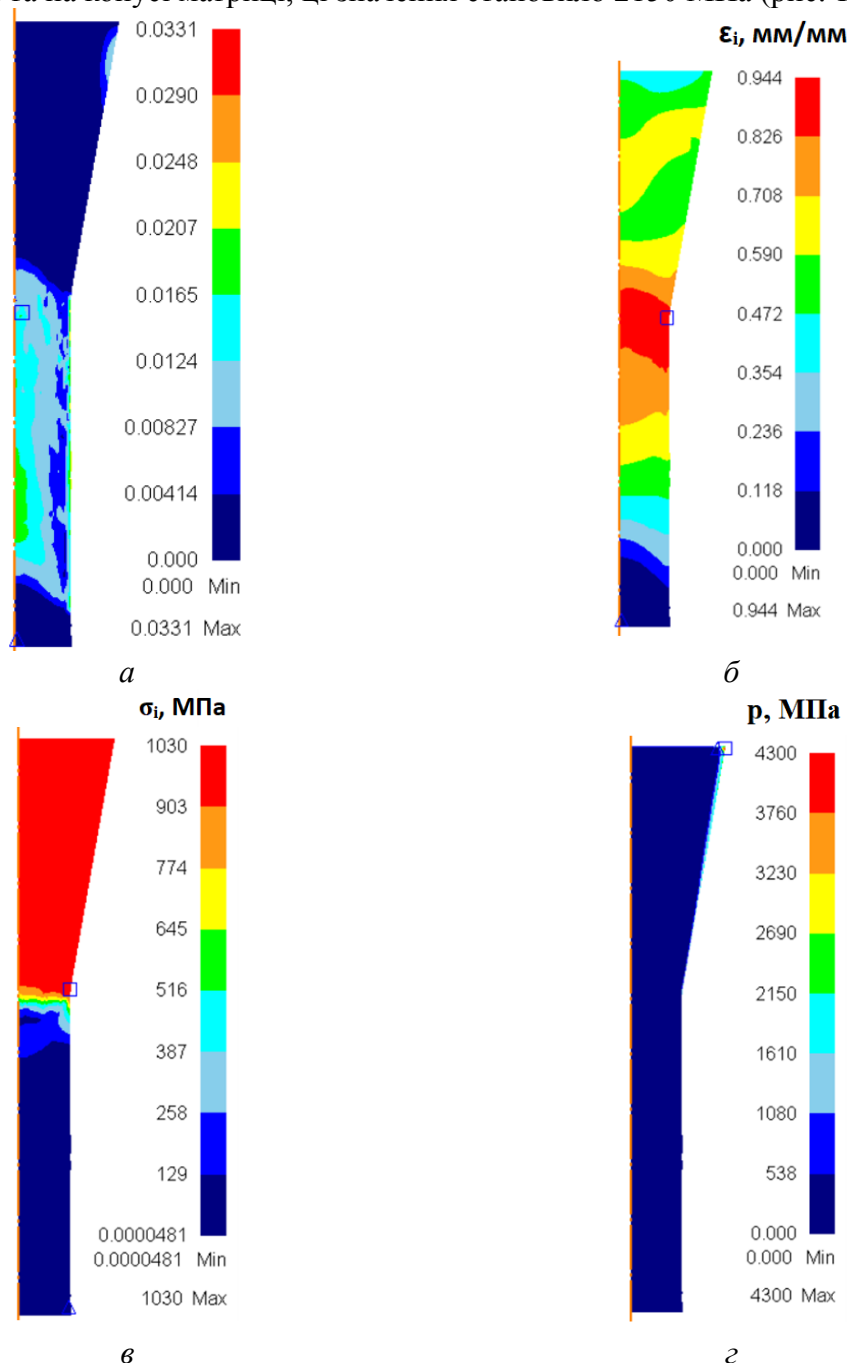


Рис. 10. Розподіл параметрів НДС:

а – ступінь використання ресурсу пластичності; б – інтенсивність деформації;
в – інтенсивність напружень; г – нормальний тиск на поверхні інструменту

При моделюванні процесу гідромеханічного видавлювання з протитиском 205 МПа зусилля, яке діє на пуансон під час гідромеханічного видавлювання, досягає 3491 кН (рис. 11).

Результати проведення чисельних експериментів показали, що значення ступеня використання ресурсу пластичності досягає 0,0326, що не є критичним за такою схемою деформування. Значення нормального тиску на інструмент діє на торці пуансона та на конусі матриці, ці значення становили 3230 МПа. Такі результати можуть бути критичними для більшості штампових сталей та можуть призвести до руйнування робочого інструменту.

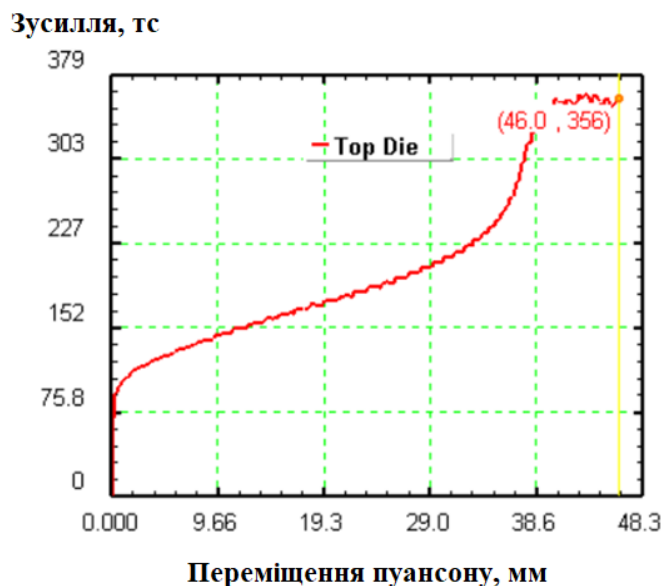


Рис. 11. Графік зусилля-переміщення при деформуванні

При моделюванні процесу гідромеханічного видавлювання з протитиском 328 МПа зусилля, яке діє на пуансон під час гідромеханічного видавлювання, досягає 1952 кН (рис. 12).

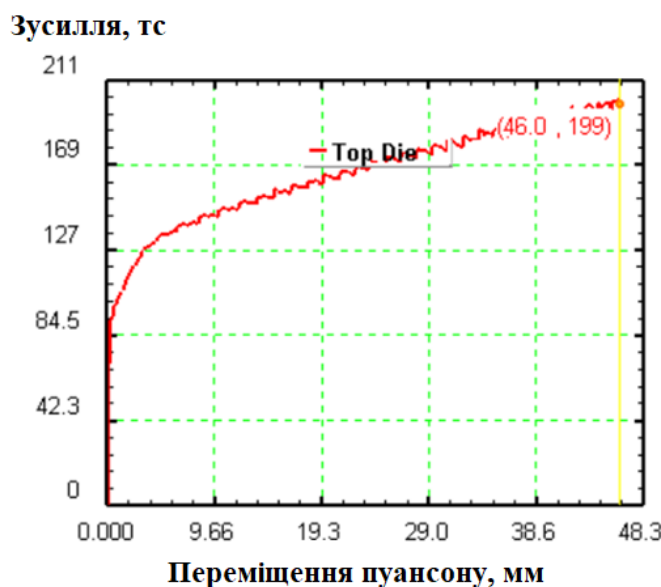


Рис. 12. Графік зусилля-переміщення при деформуванні

Результати чисельного моделювання показали, що значення інтенсивності деформації під час гідромеханічного видавлювання знаходиться в межах 0,225–0,901 (рис. 13, б). Ступінь використання ресурсу пластичності досягає 0,0362 (рис. 13, а), що не є критичним за такою схемою деформування. Значення нормального тиску на інструмент, що діє на торці пуансона та на конусі матриці, становило 2650 МПа (рис. 13, в).

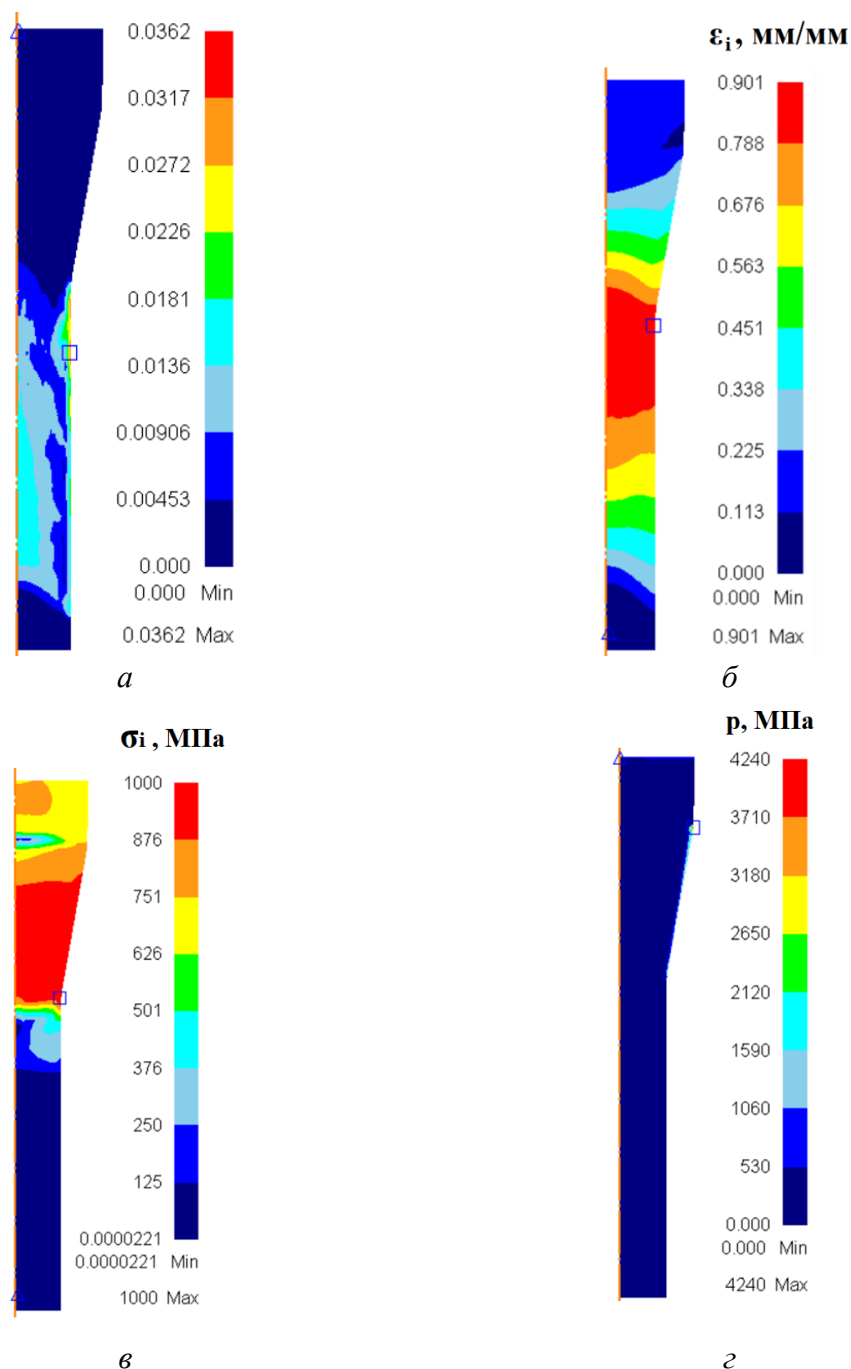


Рис. 13. Розподіл параметрів НДС:

*a – ступінь використання ресурсу пластичності; б – інтенсивність деформації;
в – інтенсивність напружень; г – нормальний тиск на поверхні інструменту*

Висновки: 1. Таким чином, застосування технології холодного гідромеханічного пресування дозволяє підвищити ряд механічних властивостей заготовок за рахунок зміцнення та подрібнення структури зерна матеріалу. Вироби, отримані таким способом, характеризуються підвищеною стійкістю матеріалу до зношення, що досить важливо для інструментальних сталей, до яких ставляться підвищені вимоги. Гідропресування також підвищує пластичність під час протікання процесу завдяки рідині, яка слугує протитиском та змащуванням для заготовки, що своєю чергою зменшує сили тертя та технологічне зусилля на інструмент.

2. Методом скінченних елементів з використанням програмного середовища Deform 2D створено та розраховано схеми гідромеханічного видавлювання з різними ступенями деформації та тиском рідини.

У процесі дослідження було проаналізовано вплив ступеня деформації та тиску рідини на напружено-деформований стан деформованої заготовки, визначено оптимальні величини тиску.

Таким чином, проведення моделювання процесу гідромеханічного видавлювання при різних величинах тиску рідини показало що:

а) збільшення тиску рідини зі 123 МПа до 338 МПа суттєво не впливає на величину ступеня використання ресурсу пластичності та повністю забезпечує отримання якісних деталей;

б) зі збільшенням тиску рідини зі 123 МПа до 338 МПа зусилля процесу (зусилля на пуансоні) зменшилося на 10 %;

в) найменші напруження на матриці (2460 МПа) спостерігалися при тиску рідини 205 МПа;

г) зі збільшенням ступеня деформації з $\varepsilon = 28,69\%$, до $\varepsilon = 55,55\%$ коефіцієнт використання ресурсу пластичності зменшився з 0,097 до 0,0362, що свідчить про те, що ефективність використання гідростатичного тиску зростає зі збільшенням ступеня деформації;

д) зі збільшенням ступеня деформації з $\varepsilon = 28,69\%$, до $\varepsilon = 55,55\%$ зусилля процесу для максимального протитиску рідини збільшилось майже втричі.

Список використаних джерел

1. Черный, Ю.Ф. Гидропрессование инструментальных сталей / Ю.Ф. Черный, В. З. Спусканюк, А. А. Лядская, А. И. Опанащук. – Киев: Техніка, 1987. – 216 с.
2. Луговской, В. М. Горячая и холодная обработка материалов жидкостью сверхвысокого давления / В. М. Луговской, Г. Д. Данилов // *Металлург*. – 2011. – №3. – С. 65-68. – Режим доступа: <http://www.elektron2000.com/article/1188.html>.
3. Ицкевич, Е. С. Физика высоких давлений / Е. С. Ицкевич // *Соросовский образовательный журнал*. – 1997. – №9. – С. 78-85.
4. Луговской, В. М. Гидростатическое уплотнение сверхвысоким давлением микро- и нанопорошков / В. М. Луговской, Р. Л. Шаталов, Г. Д. Данилов // *Производство проката*. – 2012. – № 6.
5. Луговской, В. М. Рабочие камеры для обработки материалов жидкостью сверхвысокого давления / В. М. Луговской // *Металлургия*. – 2010. – №11.
6. Yash Vishnu Sawant. An overview of hydrostatic extrusion process / Yash Vishnu Sawant, Rushikesh Raju Santre, Shahnawaz Khalil Shah // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. – 2022. – Vol. 9 (07). – С. 1454-1457.
7. Garbacz, H. Nanocrystalline Titanium / H. Garbacz, K. Topolski, M. Motyka. – Elsevier, 2019. – 253 с.
8. Topolski, K. Hydrostatic extrusion of titanium – process parameters / K. Topolski, H. Garbacz, W. Pachla, K. J. Kurzydłowski // *Advances in Materials Science*. – 2007. – Vol. 7. – № 4 (14). – С.114-120.
9. Ura-Binczyk, E. Effect of Grain Refinement on the Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel / E. Ura-Binczyk // *Materials*. – 2021. – Vol. 14(24). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247517>.
10. Skorupska, Monika. Structural Hierarchy of PA6 Macromolecules after Hydrostatic Extrusion / Monika Skorupska, Mariusz Kulczyk, Piotr Denis, Dominik Grzęda, Anna Czajka, Joanna Ryszkowska // *Materials*. – 2023. – Vol. 16(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16093435>.
11. Tomasz Majda. Influence of hydrostatic extrusion process on the microstructure and texture of polycrystalline nickel / Tomasz Majda, Dorota Moszczyńska, Joanna Zdunek, Mariusz Kulczyk, Jarosław Mizera, Krzysztof Jan Kurzydłowski // *Materials Science and Technology*. – 2017. – Vol. 33(17). – С. 2046-2052. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1343263>.
12. Луговской, В. М. Автофритированные и двухслойные рабочие камеры для гидростатической обработки материалов / В. М. Луговской, Р. Л. Шаталов, Г. Д. Данилов // *Производство проката*. – 2011. – № 8.

13. О некоторых способах и устройствах для холодного гидростатического выдавливания формообразующих полостей штампов и пресс-форм / Ю. Ф. Черный, П. Е. Шмальц, Н. А. Шмальц, В. Л. Калюжний // Физика и техника высоких давлений. – 1982. – № 9. – С.14-18.

14. Колпашников, А.И. Гидропрессование металлов / А. И. Колпашников, В. А. Вялов – Москва : Металлургия, 1973. – 296 с.

15. Уральский, В. И. Деформация металлов жидкостью высокого давления / В. И. Уральский, В. С. Плахотин, Н. И. Шефтель. – Москва : Металлургия, 1977. – 424 с.

References

1. Cherniy, Y., Spuskanyuk, V., Lyadskaya, A., Opanaschuk, A. (1987). *Gidropressovanie instrumentalnykh staley [Hydropressing of tool steels]*. Tekhnika.

2. Luhovskoi, V., Danylov, H. (2011). Goriachaia i kholodnaia obrabotka materialov zhidkostiu sverkhvesokogo davleniia [Hot and cold forming of materials with ultra-high pressure liquid]. *Metallurh – Metallurgy*, 3, 65-68. <http://www.elektron2000.com/article/1188.html>.

3. Itskevych, E. (1997). Fizika vesokikh davlenii [Physics of high pressures]. *Sorosovskii obrazovatelnyi zhurnal – Soros Educational Journal*, 9, 78-85.

4. Luhovskoi, V., Shatalov, R., Danylov, H. (2012). Gidrostaticheskoe uplotnenie sverkhvysokim davleniem mikro- i nanoporoshkov [Hydrostatic compaction of micro- and nanopowders using ultra-high pressure]. *Proizvodstvo prokata – Rolled products production*, 6.

5. Luhovskoi, V., Danylov, H. (2010). Rabochie kamery dlia obrabotki materialov zhidkostiu sverkhvysokogo davleniia [Working chambers for processing materials with ultra-high pressure liquid]. *Metallurh – Metallurgy*, 11.

6. Sawant, Y. V., Santre, R. R., Shah, S. K. (2022). An overview of hydrostatic extrusion process. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 9(07), 1454-1457.

7. Garbacz, H., Topolski, K., Motyka, M. (2019). *Nanocrystalline Titanium*. Elsevier.

8. Topolski, K., Garbacz, H., Pachla, W., Kurzydłowski, K. J. (2007). Hydrostatic extrusion of titanium – process parameters. *Advances in Materials Science*, 7, 4 (14), 114-120.

9. Ura-Binczyk, E. (2021). Effect of Grain Refinement on the Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel. *Materials*, 14(24).

10. Skorupska, M., Kulczyk, M., Denis, P., Grzęda, D., Czajka, A., Ryszkowska, J. (2023). Structural Hierarchy of PA6 Macromolecules after Hydrostatic Extrusion. *Materials*, 16(9), 3435. <https://doi.org/10.3390/ma16093435>

11. Majda, T., Moszczyńska, D., Zdunek, J., Kulczyk, M., Mizera, J., Kurzydłowski, K. J. (2017). Influence of hydrostatic extrusion process on the microstructure and texture of polycrystalline nickel. *Materials Science and Technology*, 33(17), 2046-2052. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1343263>.

12. Luhovskoi, V., Shatalov, R., Danylov, H. (2011). Avtofritirovannye y dvukhsloinye rabochie kamery dlia gidrostaticheskoi obrabotki materialov [Autofretting and double-layer working chambers for hydrostatic processing of materials]. *Proizvodstvo prokata – Rolled products production*, 8.

13. Cherniy, Y., Shmalts, P., Shmalts, N., Kalyuzhnyi, V. (1982). О некоторых способах и устройствах для холодного гидростатического выдавливания формообразующих полостей штампов и пресс-форм [About some methods and devices for cold hydrostatic extrusion of form-building cavities of dies and molds]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii – Physics and high pressure technology*, 9, 14-18.

14. Kolpashnikov A., Vyalov, V. (1973). *Gidropressovanie metallov [Hydropressing of metals]*. Metallurgiiia.

15. Uralskiy, V., Plahotin, V., Sheftel, N. (1977). *Deformatsiia metallov zhidkostiu vysokogo davleniia [Deformation of metals by high pressure liquid]*. Metallurgiiia.

Отримано 14.05.2024

**Serhii Sabol¹, Olha Kholiavik², Yurii Borodii³,
Pavlo Protsenko⁴, Valerii Pimanov⁵, Heorhii Kompaniiets⁶**

¹ PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: sabol1@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8585-508X>

² PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.holiavik@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6539-4467>

³ PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: borodiiyurii@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8050-0379>

⁴ PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Department of machine design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: pavloprocenko64@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9390-0718>

⁵ PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: pimanov@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6609-6904>

⁶ student

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: gora272002@gmail.com

INFLUENCE OF LIQUID PRESSURE ON THE TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF METAL UNDER DIRECT HYDROMECHANICAL EXTRUSION OF VISESIMETRIC PRODUCTS

In the process of cold plastic hydromechanical extrusion of metals, which is carried out at high (1-2 GPa) hydrostatic pressure applied to the focus of plastic deformation of the workpiece, tool steels undergo significant deformations that effectively affect their structure and physical and mechanical characteristics. These deformations, in combination with thermomechanical processing, open up new possibilities for increasing the stability of cutting and stamping tools. For example, cutters, drills, taps, punches and reamers made by the method of cold hydromechanical extrusion demonstrate stability 4 times higher than tools created by traditional techno.

The mechanical properties of the workpieces increase due to the strengthening and refinement of the grain structure of the material. Hydromechanical extrusion also increases plasticity during the process due to the liquid, which serves as back pressure and lubricant for the workpiece, which in turn reduces frictional forces and technological forces on the tool.

The paper presents the results of numerical experiments on modelling the process of cold hydromechanical extrusion using the finite element method using the Deform software complex. The modelling was carried out to determine the influence of the main parameters of extrusion (fluid pressure, degree of deformation, boundary conditions) on the stress-strain state of the workpiece, the force of hydromechanical extrusion and the degree of use of the plasticity resource.

The optimal value of the process parameters was determined from the point of view of ensuring the maximum amount of technological plasticity of parts during hydromechanical extrusion.

Keywords: hydromechanical extrusion; modelling; finite element method; stress-strain state; failure criterion; utilization factor; degree of deformation; pressing force.

Fig.: 13. References: 15.

**Юрій Петрович Бородій¹, Олександр Анатолійович Садовський²,
Ольга Віталіївна Холявік³, Сергій Францевич Сабол⁴,
Павло Юрійович Проценко⁵, Валерій Володимирович Піманов⁶**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: borodiyuriy@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8050-0379>

²ТОВ «БК НВФ» (Київ, Україна)
E-mail: sadovskiy.oleksandr@gmail.com

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: o.holiavik@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6539-4467>

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: sabol1@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8585-508X>

⁵кандидат технічних наук, старший викладач кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: pavloprocenko64@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9390-0718>

⁶кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: pimanov@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6609-6904>

РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛИСТОВИМ ШТАМПУВАННЯМ

Технології ковальсько-штампувального виробництва мають прогресивний характер, що забезпечує високу якість, точність, продуктивність та покращення механічних властивостей деталей, що є необхідним для авіабудівної та аерокосмічної галузі. Однак виникає потреба у створенні нових типів обладнання для виготовлення певної групи деталей. Метою роботи є вироблення технічних пропозицій щодо використання штампувального обладнання та оснащення нетипової конструкції для отримання деталей з листових заготовок, які будуть впроваджені у виробництво. В роботі запропонована конструкція спеціального обладнання для виготовлення листових деталей, що базується на застосуванні пневмоциліндру.

Ключові слова: прес; штамп; вирубування; пробивання; гнуття; матриця; пуансон; зазор; заготовка; деталь.
Рис.: 9. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Головне призначення ковальсько-штампувального обладнання полягає у формозмінненні металів, сплавів, неметалевих матеріалів під дією тиску. Для того, щоб привести матеріал в пластичний стан та подолати опір деформуванню, ковальсько-штампувальна машина повинна створювати необхідне деформуєче питоме зусилля при заданому переміщенні з необхідною швидкістю [1-3].

Загальновідомо, що технології ковальсько-штампувального виробництва мають прогресивний характер, який базується на отриманні деталей заданої форми із заготовок не шляхом відділення частини металу в стружку або відхід (подібно обробці металів різанням), а шляхом раціонального перерозподілу металу. Це дає можливість скоротити всі види грубої обробки різанням та іншими видами обробки, а також зменшити фінішні операції (шліфування та інші). Використання штампувальних операцій забезпечує високу продуктивність та підвищення механічних властивостей деталей [1-4].

Найбільш чутливою до стану та розвитку ковальсько-штампувального обладнання є авіабудівна та аерокосмічна галузь. Для об'єктів аерокосмічної техніки необхідно отримувати деталі мінімальної ваги з максимальними службовими та експлуатаційними характеристиками, що, як правило, може забезпечити тільки обробка матеріалів тиском. З цієї причини для збереження України як розвинутої промислової країни в умовах війни необхідна підтримка та розвиток основи всього машинобудування: ковальсько-пресового машинобудування (КПМ), ковальсько-штампувального виробництва (КШВ) і обробки металів тиском (ОМТ) [1-4].

Постановка проблеми. Попри різноманіття наявного обладнання, у виробництві іноді виникає потреба у створенні нових типів обладнання для виготовлення певної групи деталей. Нове обладнання, що розробляється, має певні переваги у порівнянні з існуючим ковальсько-штампувальним обладнанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з [1-3] ковальсько-штампувальні машини за головними конструктивними ознаками або технологічним призначенням поділяються на 12 видів, які характеризуються номінальним зусиллям від 25 кН до 750 МН, ефективною енергією від 1 кДж до 5 МДж, діапазоном швидкостей від 1 мм/с до 100 м/с. Основними видами ковальсько-штампувального обладнання є кривошипні преси, гідравлічні преси, молоти та інше обладнання для гарячого штампування, ротаційні машини, гідроімпульсні установки та багато інших типів машин.

Сьогодні, в світі, також розвивається напрямок, що стосується розробки пресів для листового штампування, в яких в якості силових елементів машин для виконання простих операцій різки [5], вирубки, пробивки [6] та гнуття [7] заготовок з листових матеріалів, використані пневмоциліндри. У роботах [5-7] пневматичні преси використовуються для виконання спеціальних технологічних операцій, і їх конструкція не передбачає їх універсального застосування.

На ринку України пропонуються для виконання операцій обробки металів тиском (листоове штампування) кривошипні та гідравлічні преси (рис. 1-а) [8]. Конструкція цих пресів містить станину, яка сприймає навантаження, що виникають під час процесу формування заготовки. Пневмогідравлічні [9] та пневматичні преси [10] здебільшого використовуються в галузях харчової та легкої промисловості і як і гідравлічні мають станину.



Рис. 1. Преси:

а – гідравлічний [8]; б – пневмогідравлічний [9]; в – пневматичний [10]

Сучасні пневмоциліндри дозволяють розвивати зусилля до 5 тс. Такі зусилля дають можливість виконувати операції листового штампування з металами чи сплавами.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Війна в Україні показала, що успішність на полі бою залежить від наявності достатньої кількості боєприпасів та БПЛА для розвідки та виконання ударів по противнику. БПЛА містять складові елементи, що виготовляються з листових матеріалів, для отримання яких в масовій кількості потрібно створювати мережу підприємств, що мають бути оснащені ковальсько-штампувальними пресами. В умовах обмежених коштів потрібно шукати варіанти конструктивного виконання цих пресів, які дозволять спростити та здешевити їхню конструкцію. У цій роботі розглянута конструкція пресу для листового штампування з силовою установкою на основі пневмоциліндру. На сьогодні в Україні такі варіанти пресового обладнання є рідкістю.

Мета дослідження (статті):

1. Розгляд можливості використання штампувального обладнання нетипової конструкції для отримання деталей з листових заготовок.

2. Розробка конструкції та проектування спеціалізованого обладнання та оснащення для штампування деталей.

3. Аналіз переваг розробленої конструкції з традиційним ковальсько-штампувальним обладнанням.

Виклад основного матеріалу. Розробка пневматичного преса велась для отримання деталей з листової заготовки, модель якої показана на рис. 2. Ця деталь є типовою для машинобудування. Деталь є порівняно нескладною, і для її отримання достатньо виконати операції пробивання, вирубання та гнуття [4; 11-13].



Рис. 2. Готова деталь:
а – модель; б – реальні деталі

У процесі розробки технологічного процесу виникла необхідність розрахунку вихідної заготовки з листового матеріалу. На рис. 3 показаний ескіз заготовки з основними розмірами з урахуванням геометрії готової деталі після гнуття [4; 11-13].

Згідно розробленої технології виготовлення були проведені технологічні розрахунки, результатами яких є:

- 1) довжина заготовки – 51,4 мм;
- 2) сумарна довжина вирубання – 172,36 мм;

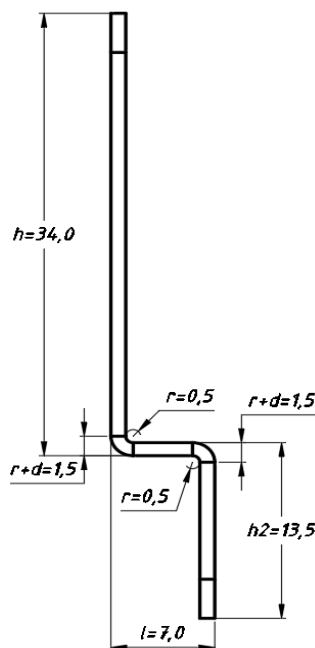


Рис. 3. Ескіз заготовки з основними розмірами

3) силові параметри: зусилля вирубання та пробивання 2,65 тс; сумарне зусилля гнуття – 0,6 тс; зусилля для проштовхування відходів штамповки – 0,32 тс; зусилля для зняття заготовки з пуансонів – 0,17 т.

Отже, необхідне зусилля для виготовлення (штампування) деталі становить 3,74 тс.

Згідно з розробленою конструкцією для виконання технологічних операцій листового штампування використовується енергія стисненого повітря. Це дозволяє отримати такі технічні, технологічні та економічні ефекти:

- значно спростити конструкцію ковальсько-штампувального обладнання, використовуючи стандартні вузли (пневмоциліндри);

- розроблена установка для листового штампування має невелику масу та габаритні розміри, що дає певний економічний ефект;

- установка легко вписується у гнучкі виробничі системи, оскільки має можливість легкого переміщення по території цеху;

- використання стисненого повітря як джерела механічної енергії виключає необхідність застосування дорогих та складних механічних, електричних та гідروприводів.

Отримане значення технологічного зусилля задовольняє умові ($3,57 < 5$ тс), за якою буде проводитись вибір джерела механічної енергії – пневмоциліндра.

Оскільки пневмоциліндри виготовляються стандартними, то з наявного ряду вибираємо циліндр, показаний на рис. 4, де вказані його габаритні характеристики. Зображення пневмоциліндра та його основні частини представлені на рис. 5.

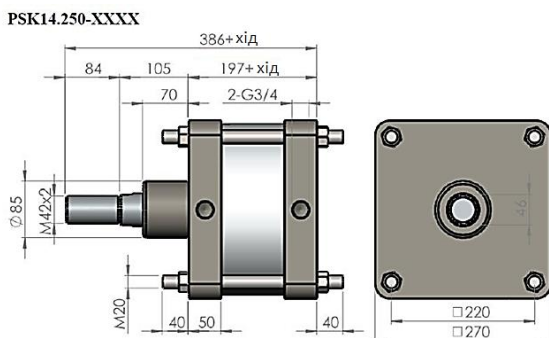


Рис. 4. Габаритні характеристики обраного пневмоциліндра



Рис. 5. Зовнішній вигляд пневмоциліндра

На рис. 6 зображена схема конструкції циліндра та показані основні його деталі. Основними частинами пневмоциліндра є корпус 23 трубчастої форми, який має задню 13 та передню 20 кришки, алюмінієвий поршень 20, який з'єднаний із штоком 21, що має кріпильну та регульовальну гайку 1. Використання в якості основної корпусної деталі труби значно спрощує конструкцію всього пневмоциліндра загалом та знижує його вартість. Корпус циліндра та кришки стягуються гвинтами 18. Між передньою кришкою 20 і штоком 21 розміщена направляюча втулка 4 та ущільнення 2 та 3, а також амортизуюче ущільнення 19. Між циліндром і поршнем містяться ущільнення 7, 8 та 22. Основні елементи регульованого демпфування показані на позиціях 9 та 10 (рис. 6).

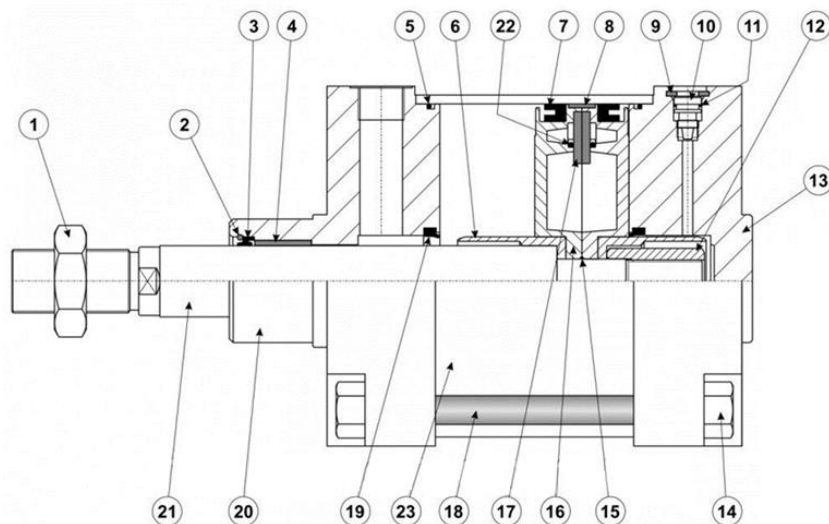


Рис. 6. Переріз пневмоциліндра:

- 1 – кріпильна гайка; 2 – ущільнення штока; 3 – ущільнювач; 4 – направляюча втулка;
- 5 – ущільнення кришки; 6 – алюмінієва втулка; 7 – направляюче ущільнення поршня (ліве);
- 8 – направляюче ущільнення поршня (праве); 9 – регульоване демпфування;
- 10 – регулюючий гвинт; 11 – ущільнення; 12 – гайка поршня; 13 – задня кришка;
- 14 – стягуючий гвинт; 15 – ущільнення поршня; 16 – алюмінієвий поршень; 17 – магніт;
- 18 – сталевий стрижень; 19 – амортизуюче ущільнення NBR або Viton; 20 – передня кришка; 21 – хромований шток; 22 – ущільнення поршня; 23 – алюмінієва гільза – труба

На рис. 7 представлена модель всієї установки для штампування в зборі. Основними частинами установки є циліндр, розташований зверху, та штамп, у якому отримується деталь (нижня частина). Тривимірна модель штамп окремо показана на рис. 8.

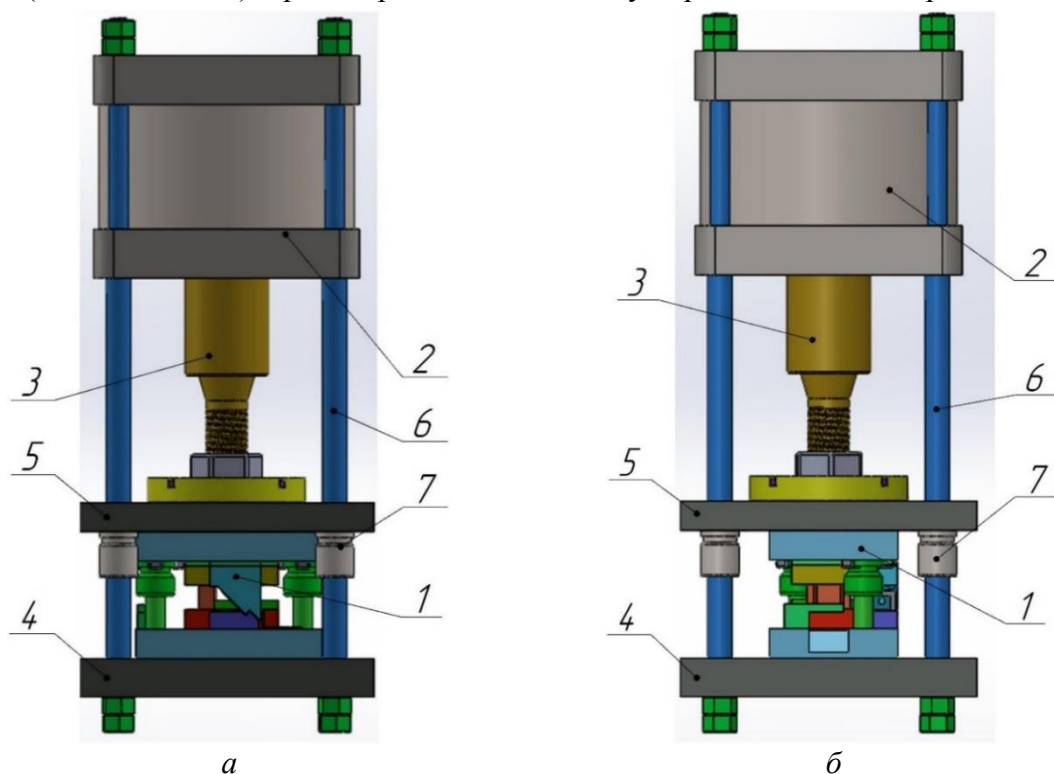


Рис. 7. Модель обладнання у складі пресу та штампу:

а – головний вид; б – вид з боку; 1 – штамп; 2 – пневмоциліндр; 3 – плунжер; 4 – стіл; 5 – рухома поперечина (повзун); 6 – колонка; 7 – втулка

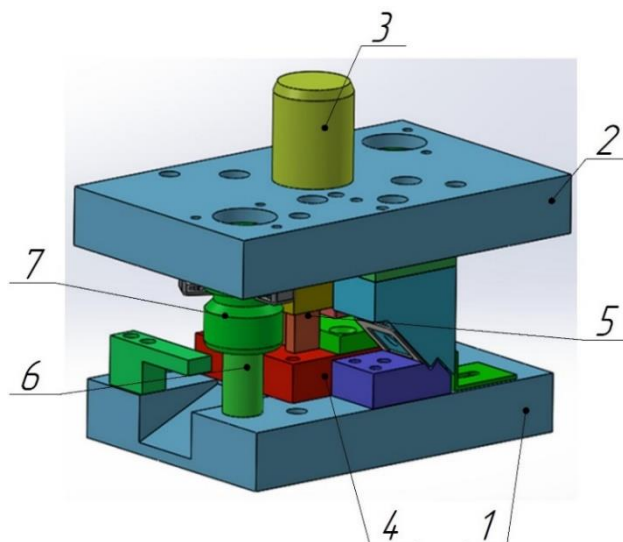


Рис. 8. Модель штампу:

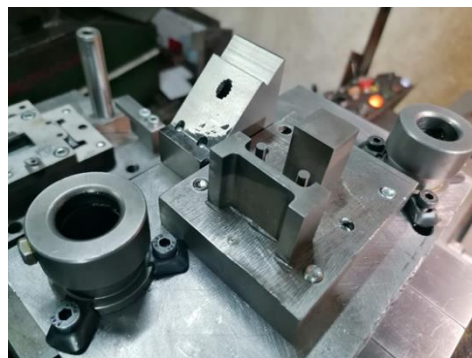
1 – нижня плита; 2 – верхня плита; 3 – хвостовик; 4 – блок матриць; 5 – блок пуансонів; 6 – колонка; 7 – втулка

Після розробки та проектування штамп був направлений на виготовлення. За принципом дії штамп є штампом простої дії. Загальний вигляд штамп у розібраному вигляді, а також його основні частини (верхня та нижня), показані на рис 9. Конструктивно штамп

не має відмінностей від традиційних штампів простої дії для листового штампування. Його основними частинами є блок штапу, який складається з верхньої та нижньої плит та направляючих колонок і втулок, а також інструментів – пуансонів та матриць.



а



б

*Рис. 9. Зовнішній вигляд штапу:
а – нижня частина; б – верхня частина*

Загальний вигляд всієї установки в зборі, яка використовується у виробничих умовах, представлений на рис. 10. Як можна побачити на зображенні, розроблена установка є конструктивно простою, вирізняється невеликими габаритними розмірами і, як наслідок, масою.

Порівняно з традиційним ковальсько-штампувальним обладнанням установка може бути легко переміщена по площам виробничих цехів та не потребує громіздких фундаментів. Важливою її конструктивною перевагою є відсутність станини, порівняно із розглянутими в цій роботі пресами [6-10].



Рис. 10. Зовнішній вигляд пресу

Переваги розробленого обладнання над стандартним ковальсько-штампувальним обладнанням:

1. Відсутність потреби в дорогому ковальсько-штампувальному обладнанні.
2. Технічна простота розробленої конструкції з використанням стандартного вузла.
3. Невелика маса та габаритні розміри установки, відсутність обмежень місця розміщення установки в цеху, відсутність фундаменту.
4. Використання стисненого повітря як джерела механічної енергії, відсутність електродвигунів та електрообладнання, масивних станин та складних механічних громіздких приводів з обертовими деталями (маховиками), відсутність гідроприводів тощо.

5. Можливість створення конструктивно подібного ряду пресів на основі стандартних пневмоциліндрів.

Висновки.

1. Сформульовані пропозиції щодо використання штампувального обладнання нетипової конструкції для отримання деталей з листових заготовок.

2. Було розроблено конструкцію та спроектовано спеціалізоване обладнання (рис. 7) та оснащення (рис. 8) для штампування деталі з листової заготовки. Розроблене обладнання (прес) має конструктивні, технічні та економічні переваги перед традиційними видами ковальсько-штампувального обладнання.

3. Особливістю розробленого пресу є використання стандартного пневмоциліндра, який безпосередньо з'єднується із штампом, що значно спрощує конструкцію всієї установки, зменшується кількість деталей, відпадає необхідність у станині та інших деталях, які використовуються в пресах.

Список використаних джерел

1. Плеснецов, Ю. О. Ковальсько-штампувальне обладнання. Механічні преси : навч. посіб. / Ю. О. Плеснецов, В. О. Маковей – Харків : НТУ «ХП», 2014. – 236 с.

2. Гожій, С. П. Ковальсько-штампувальне обладнання. Гвинтові преси [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра, які навчаються за спеціальністю 131 "Прикладна механіка", освітніми програмами: «Механіка пластичності матеріалів» та «Технологія виробництва літальних апаратів» / С. П. Гожій, С. Ф. Сабол, А. В. Кліско ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,65 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 38 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8e10d61e-d814-4415-a959-90ceb88fff63/content>.

3. Гожій, С. П. Ковальсько-штампувальне обладнання. Гідравлічні преси [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра, які навчаються за спеціальністю 131 "Прикладна механіка", освітніми програмами: «Механіка пластичності матеріалів» та «Технологія виробництва літальних апаратів» / С. П. Гожій, С. Ф. Сабол, А. В. Кліско ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 25,36 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 155 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/99ce62cb-664f-4fd4-845d-fd33f2f14096>.

4. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.

5. Design and Development of Pneumatic Sheet Metal Cutting Machine / J. Om Prasaad, A. V. Krishnan, Parth Lokhande, Biradar Mustafa // International Conference on Advances in Mechanical Engineering-2022 (ICAME-2022) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1259/1/012020>.

6. Jäckel M. Effects of increased tool velocity on mechanical joining of steel and aluminum sheet metals / M. Jäckel, C. Kraus, T. Kropp // Conference on Assembly Technologies and Systems, 2014. – С. 24-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.062>.

7. Joanna Cyganiuk. Pneumatic Press for Cold Bending of Metal Elements / Joanna Cyganiuk // Acta Mechanica Slovaca. – 2015. – № 19(2). – С. 36-41.

8. ТОВ АСПЕКТ 2000 - гідропневмообладнання та електромумфти до промислового обладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://aspect.prom.ua/ua/p1089373343-gidravlicheskij-press-100tn.html>.

9. Hydromarket [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hydromarket.com.ua/ua/p716870161-pnevmaticheskij-press-p81720.html>.

10. SHVEJNIK [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://shvejnik.com.ua/ua/pres-dlya-metalofurnituri-s-qq03.html>.

11. Зубцов, М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1980. – 432 с.

12. Аверкиев, Ю. А. Технология холодной штамповки : учебник для вузов / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. – Москва : Машиностроение, 1989. – 304 с.

13. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 278 с.

References

1. Pliesnetsov, Y., Makovei, V. (2014). *Kovalsko-shtampuvalne obladnannia. Mekhanichni presy [Forging and stamping equipment. Mechanical presses]*. NTU «KhPI».
2. Hozhii, S., Sabol, S., Klisko, A. (2020). *Kovalsko-shtampuvalne obladnannia. Hvyntovi presy [Forging and stamping equipment. Screw presses]*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
3. Hozhii, S., Sabol, S., Klisko, A. (2020). *Kovalsko-shtampuvalne obladnannia. Hidravlichni presy [Forging and stamping equipment. Hydraulic presses]*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
4. Romanovskiy, V. (1979). *Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Cold Forming Handbook]*. Sixth edition, revised and expanded. Mashinostroenie. Leningrad department.
5. Om Prasaad, J., Krishnan, A.B., Lokhande, P., Mustaffa, B. (2022). Design and Development of Pneumatic Sheet Metal Cutting Machine. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering-2022 (ICAME-2022) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*.
6. Jäckel, M., Kraus, C., Kropp, T. (2014). Effects of increased tool velocity on mechanical joining of steel and aluminum sheet metals. *Conference on Assembly Technologies and Systems*.
7. Cyganiuk, J. (2015). Pneumatic Press for Cold Bending of Metal Elements, *Acta Mechanica Slovaca*, 19(2).
8. LLC ASPEKT 2000 - hydropneumatic equipment and electric couplings for industrial equipment. <https://aspect.prom.ua/ua/p1089373343-gidravlicheskiy-press-100tn.html>.
9. PNEUMATIC PRESS P81720 (20 TONS). <https://hydromarket.com.ua/ua/p716870161-pnevmaticheskij-press-p81720.html>.
10. SHVEJNIK. <https://shvejnik.com.ua/ua/pres-dlya-metalofurnituri-s-qq03.html>.
11. Zubtsov, M. (1980). *Listovaya shtampovka [Sheet stamping]*. Third edition, revised and expanded. Mashinostroenie.
12. Averkiev, Yu., Averkiev, A. (1989). *Tehnologiya holodnoy shtampovki [Cold forming technology]*. Mashinostroenie.
13. Popov, E. (1977). *Osnovni teorii listovoy shtampovki [Fundamentals of the sheet metal forming theory]*. Second edition, revised and expanded. Mashinostroenie.

Отримано 15.05.2024

UDC 621.979.06

**Yurii Borodii¹, Oleksandr Sadovskiy², Olha Kholiavik³,
Serhii Sabol⁴, Pavlo Protsenko⁵, Valerii Pimanov⁶**

1 PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: borodiyuriy@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8050-0379>

2BK NVF LIMITED LIABILITY COMPANY (BK NVF LLC) (Kyiv, Ukraine)

E-mail: sadovskiy.oleksandr@gmail.com

3 PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.holiavik@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6539-4467>

4 PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: sabol1@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8585-508X>

5 PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Department of machine design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: pavloprocenko64@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9390-0718>

6 PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Technology of aircraft production National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: pimanov@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6609-6904>

DEVELOPMENT OF SPECIALIZED EQUIPMENT FOR MANUFACTURING PARTS BY THE SHEET STAMPING METHOD

The technologies of forging and stamping production are progressive, which ensures high quality, precision, productivity and improvement of the mechanical properties of parts, which is necessary for the aircraft and aerospace industries. Despite the variety of existing equipment, in production, there is sometimes a need to create new types of equipment for the production of a certain group of parts. The purpose of the work is to develop technical proposals for the use of stamping equipment and the equipment of an atypical design for obtaining parts from sheet blanks.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

In the article possible technologies for obtaining a part from a sheet blank was analyzed. The adopted part (figure 1) is relatively simple, and punching, cutting and bending operations are enough to obtain it. To obtain it, a manufacturing technology was developed, technological calculations were carried out, and the power parameters of the process were determined: blanking, piercing and bending forces.

Compressed air energy can be used to perform technological operations of sheet stamping if the condition for the process force of no more than 5 tf is satisfied. The developed equipment uses a standard pneumatic cylinder as a power unit.

The designed stamp is structurally similar to traditional single-action stamps for sheet stamping.

Based on the results of the work, a press with an effort of 5 tf and a stamp for the production of a sheet part were made. The developed equipment (press) has structural, technical and economic advantages over existing types of forging and stamping equipment. Technical proposals were formulated for the use of stamping equipment of atypical design to produce parts from sheet blanks.

Keywords: *press; stamp; blanking; piercing; bending; die; punch; clearance; workpiece; part.*

Fig.: 9. References: 13.

Олександр Дмитрович Петров¹, Євген Валентинович Корбут²

¹аспірант кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: petrovsasha69@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: korbut1@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1221-4052>

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СВЕРДЕЛ ІЗ ДИСКРЕТНО МОДИФІКОВАНИМИ РОБОЧИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ ІЗ ВОЛОКНИСТИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Питання використання різального інструменту з модифікованими робочими поверхнями у вигляді дискретних ділянок для обробки деталей із волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ) на сьогодні недостатньо вивчене. Одним з основних параметрів, що впливає на якість обробленої поверхні деталі з ВПКМ являється температура, що виникає в зоні різання. За даними наукових досліджень одним зі шляхів підвищення якості обробки різанням є зменшення часу контакту різальної кромки з оброблюваним матеріалом ВПКМ. Запропонована в роботі концепція, що при використанні різального інструменту з модифікованими робочими поверхнями у вигляді дискретних ділянок з регулярно розташованими на них глобулами, що являють собою різальні елементи, за рахунок дискретизації робочої поверхні процес являється переривчастим різанням, тобто час контакту різальної кромки з поверхнею ВПКМ зменшується, що в свою чергу дозволяє підвищити якість обробленої поверхні виробу. Для підтвердження цієї гіпотези проведено відповідні експерименти, результати яких показали зменшення товщини дефектного шару в порівнянні з рекомендованим для використання інструментом.

Ключові слова: процес різання; волокнисті полімерні композитні матеріали (ВПКМ); покриття дискретної структури, якість поверхні, дефектний шар.

Рис.: 4. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Одним з основних споживачів деталей із ВПКМ є авіакосмічна галузь, автомобілебудування та машинобудування [1; 2]. Однак одним зі стримуючих фактором більш широкого впровадження виробів з ВПКМ є їхня висока вартість, не технологічні у виготовленні, оскільки при механічній обробці деталей із ВПКМ стикаються з такими проблемами:

1. Складність отримання високої якості оброблених поверхонь (необхідної шорсткості, точності, відсутність сколів, ворсистості тощо за рахунок анізотропії властивостей матеріалу, низьким адгезійним зв'язком між армуючим матеріалом та матрицею).
2. Низькою теплопровідністю ВПКМ, у результаті чого відбувається малий відвід тепла із зони різання.
3. Інтенсивне абразивне зношення різального інструменту за рахунок впливу твердого наповнювача ВПКМ.
4. Низька продуктивність процесу через низькі швидкості різання.
5. Пружне відновлення (усадка) формоутворених поверхонь полімерних композиційних матеріалів знижує точність обробки.
6. Виділення дрібнодисперсних летких токсичних частинок ПКМ під час обробки.

Підвищення якості та точності оброблених поверхонь виробів з ВПКМ є одним із пріоритетних завдань у машинобудівній, авіакосмічній та інших галузях промисловості.

Постановка проблеми. До обробки різанням ВПКМ, як до технологічного процесу ставляться вимоги щодо забезпечення якості отриманих поверхонь, продуктивність технологічного процесу, економічність. Одним із найбільш важливим для авіабудівної промисловості є показник якості отриманої поверхні у виробі з ВПКМ, оскільки дефекти поверхні негативно впливають на експлуатаційні показники й довговічність виробу. Проте важливим завданням є підвищення якості обробленої поверхні зі збереженням продуктивності процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогодні проводиться багато досліджень з вивчення умов забезпеченню якості процесу обробки ВПКМ різанням. Багато робіт присвячено вивченню механіки руйнування, мікро- та макроруйнуванню волокнистих полімерних композиційних матеріалів [2].

Дослідження проводяться з розробки нових видів обробки різанням, таким як, наприклад, гідрорізання та ультразвукового різання [3], застосування нових прогресивних схем різання – із застосуванням реверсивного руху [4], дослідженню та розробки нових конструкцій та геометрії різального інструменту [5], визначенню оптимальних режимів обробки [6], нових інструментальних матеріалів та покриттів на різальний інструмент для обробки ВПКМ [7]. Останнім часом велику увагу приділяють надшвидкісному різанню [8] та вібраційному різанню [9], що значною мірою підвищують якість отриманих виробів із ВПКМ без втрати продуктивності обробки.

Але у більшості випадків з підвищенням якості обробки виробів з ВПКМ знижується продуктивність, а застосування альтернативних методів обробки потребує використання більшого за вартістю обладнання, допоміжних пристосувань, що, зрештою, призведе до збільшення собівартості виробу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На сьогодні багато досліджень проводяться з пошуку нових за складом покриттів, які дозволять підвищити зносостійкість інструменту для обробки деталей з ВПКМ і завдяки цьому підвищити працездатність різального інструменту – підвищити продуктивність обробки без зниження якості отриманих виробів. Проте роботи проводились з покриттями суцільного типу, дослідження з дискретизація поверхні покриттів та впливу топографії даних дискретних покриттів на якість обробленої поверхні деталей з ВПКМ не проводились і потребують подальших досліджень.

Якість поверхневого шару – важлива експлуатаційна характеристика, що впливає на якість спряжених поверхонь, їхню герметичність, довговічність та інше.

Так, дослідження [2] показали, що зміна товщини дефектного шару впливає на фізико-механічні властивості деталі, такі як міцність, твердість, стійкість до вологопоглинання, діелектричні властивості та інші.

Дослідження показали, що зі збільшенням глибини дефектного шару ВПКМ від 50 до 350 мкм знижується статична міцність на розтяг в 1,5 раза. А на стиск у 1,25 раза, тобто для збереження міцності композита після механічної обробки необхідно забезпечити такі умови різання, при яких глибина дефектного шару буде мінімальна.

Межа міцності на вигин та зсув також мають тенденцію на зменшення при збільшенні товщини дефектного шару, що проявляється наявністю концентраторів напружень на границі дефектного шару та матеріалу композита. Дослідження показали, що зменшення міцності на вигин проявляється при товщині дефектного шару від 50–350 мкм. Зі збільшенням товщини дефектного шару зменшується межа витривалості.

Таким чином, можна зробити висновок, що зі збільшенням товщини дефектного шару знижується статична, ударна та втомна міцність ВПКМ.

Постановка задачі. Для забезпечення експлуатаційних характеристик виробу з ВПКМ необхідно створити такі умови різання, при яких товщина дефектного шару була б мінімальна при його обробці.

Виклад основного матеріалу. Щоб підтвердити гіпотезу, що при використанні різального інструменту з модифікованими робочим поверхнями у вигляді дискретних ділянок із регулярно розташованими на них глобулами за рахунок дискретизації робочої поверхні процес є переривчастим різанням, тобто час контакту різальної кромки з поверхнею ВПКМ зменшується, що своєю чергою дозволяє підвищити якість обробленої поверхні виробу та визначити можливість використання даного інструменту проведено відповідні експериментальні дослідження.

Для визначення залежностей впливу фактору архітектури дискретного покриття глобулярної структури нанесеного на робочі поверхні інструменту на величину дефектного шару обробленого виробу з ВПКМ було проведено експериментальні дослідження, які склались із шести експериментів. У дослідженнях використовувались свердла зі ШР сталі Р6М5 DIN EN 17350 (ISO 4957) Ø8 мм з модифікованою робочими поверхнями покриттям $TiCrB_2+AlN$ у вигляді дискретних ділянок з регулярно розташованими на них глобулами товщиною $h = 3$ мкм, конструкція яких представлена на рис. 1 та рекомендовані, за даними літературних джерел свердла Guhring 732, робоче креслення якого представлено на рис. 2.

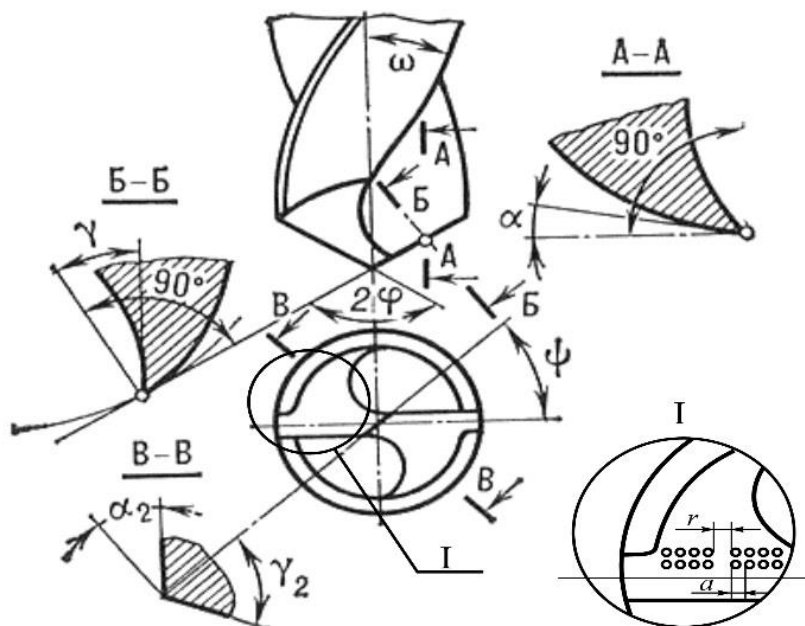
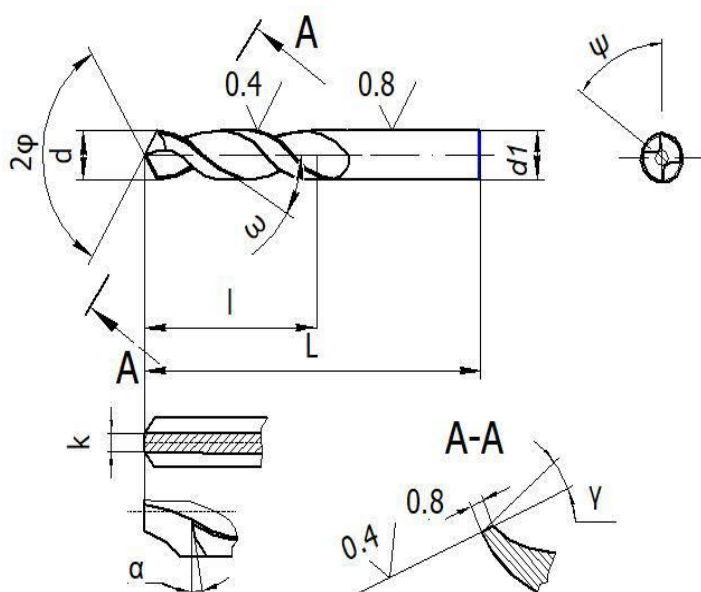


Рис. 1. Свердло гвинтове з нанесеним на його поверхні дискретним покриттям глобулярного типу; висота покриття $h = 3$ мкм, $r = 0,25$ мм, $a = 2,5$ мкм



d	8h7
2ϕ	118
$d1$	8h11
ω	27
L	117
l	66
k	2.06
γ	8
α	8..12
ψ	45..55

Рис. 2. Робоче креслення свердло Guhring 732

Режими різання представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Режими свердління склопластику марки СТЕФ-У

№ з/п	V, м/сек	S, мм/об	h, МКМ
1.	0,3	0,4	3

Експеримент проводився на верстаті 1К62.

Результати експериментів представлені на рис. 3 та 4.

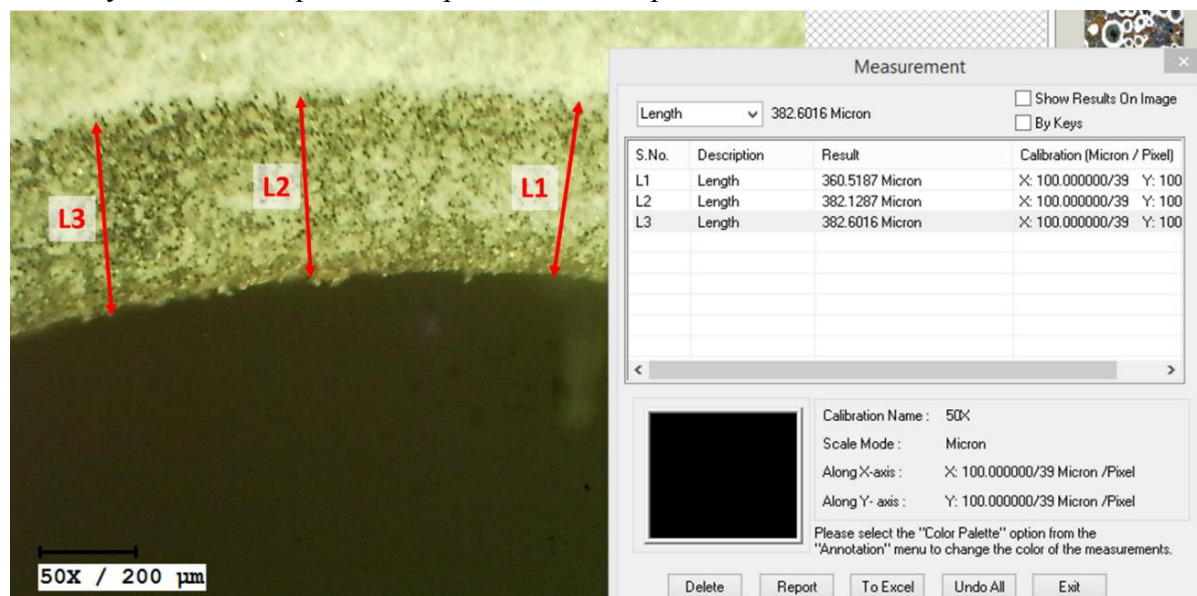


Рис. 3. Товщина дефектного шару при обробці ВПКМ свердлами Guhring 732

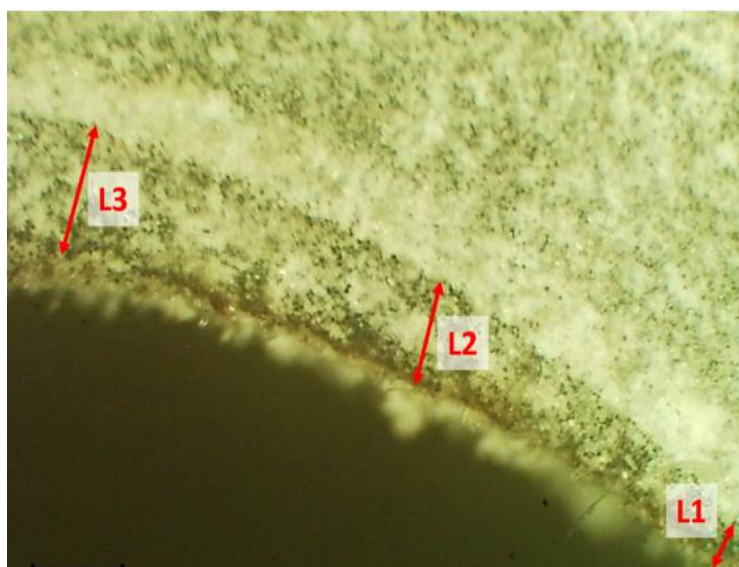


Рис. 4. Товщина дефектного шару при обробці ВПКМ свердлами з дискретним покриттям глобулярної структури при $h = 3$ мкм, $L1 = 108,2$ мкм, $L2 = 118,5$ мкм, $L3 = 130,0$ мкм

Згідно з рис. 3 та 4 можна зробити висновок, що при однакових режимах різання та геометричних параметрів свердел величина дефектного шару ≈ 3 рази менша у свердел із модифікованими робочими поверхнями дискретним покриттям глобулярної структури.

Величина значення дефектного шару як для свердел типу Guhring 732, так і для свердел із дискретним покриттям відрізняється по поверхні деталі, це можна пояснити різницею величини сили різання в центрі та на периферії різальних кромки свердла. Отримані значення корелюються з дослідженнями інших авторів [1].

Висновки. Дані експериментальних досліджень показують, що використання різального інструменту з модифікованою робочою поверхнею у вигляді дискретних ділянок з регулярно розташованими на них глобулами дозволяють зменшити товщину дефектного шару у 2,9-3,3 раза порівняно з використанням рекомендованим з літературних джерел інструментом.

Механізм впливу умов різання та архітектури інструмента з модифікованою робочою поверхнею у вигляді дискретних ділянок із регулярно розташованими на них глобулами потребує подальшого вивчення та дослідження.

Список використаних джерел

1. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) : монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, В. А. Пасечник, В. А. Колесник, С. С. Емельяненко. – Сумы, 2013. – 272 с.
2. Тарасюк, А. П. Технологии механической обработки полимерных композитов: монография / А. П. Тарасюк, О. Л. Кондратюк, Н. В. Везуб. – Харьков : Точка, 2015. – 226 с.
3. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. – Москва : Машиностроение, 1980. – 238 с.
4. Милокост, І. О. Підвищення якості отворів при свердлінні тонкостінних виробів з ортотропних вуглепластиків : дис. ... канд. техн. наук / І. О. Милокост. – Київ, 2016. – 158 с.
5. Лупкин, Б. В. Сверление ПКМ сверлами с подрезающими режущими кромками / Б. В. Лупкин, А. Л. Касс, О. М. Кошкина // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – № 49. – С. 68-80.
6. Тарасюк, А. П. Выбор рациональных условий резания полимерных композитов, обеспечивающих максимальные показатели качества поверхности / А. П. Тарасюк, А. А. Назаркин // Машинобудування: збірник наукових праць. – 2012. – № 10. – С. 115-127.
7. Корбут, Є. В. Особливості обробки ВПКМ процесом різанням / Є. В. Корбут // Перспективні технології та прилади. – Луцьк, 2018. – С. 82-87.
8. Проблемы эффективного внедрения процессов высокоскоростного резания / Ю. Н. Внуков, И. Н. Павлюченко, К. О. Папашев, А. Г. Саржинская // Современные технологии в машиностроении: сб. научных статей. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – Т. 1. – С. 43-57.
9. Wang, X. Investigation on trust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics / X. Wang, I. Wang // Journal Mater.Process.Technol. – 2004. – Vol. 1486. – Pp. 239-244.

References

1. Kryvoruchko, D.V., Zaloha, V.A., Pasechnyk, V.A., Kolesnyk, V.A., Emelianenko, S.S. (2013). *Mekhanicheskaia obrabotka kompozytsyonnykh materiyalov pry sborke letatelnykh apparatov (analytycheskyi obzor)* [Mechanical processing of composite materials during aircraft assembly (analytical review)].
2. Tarasiuk, A.P., Kondratiuk, O.L., Verezub, N.V. (2015). *Tekhnolohyy mekhanycheskoi obrabotky polymernykh kompozytov* [Technology of Mechanical Treatment of Polymer Materials]. Tochka.
3. Markov, A.Y. (1980). *Ultrazvukovaia obrabotka materiyalov* [Ultrasonic processing of materials]. Mashynostroenye.
4. Mylokost, I.O. (2016). *Pidvyshchennia yakosti otvoriv pry sverdlinni tonkostinnykh vyrobiv z ortotropnykh vuhleplastykiv* [Improving the quality of holes when drilling thin-walled products from orthotropic carbon plastics]. [Master's thesis].
5. Lupkyn, B.V., Koshkyna, O.M., Kass, A.L. (2011). *Sverlenie PKM sverlami s podrezaiushchimi rezhushchimi kromkami* [Drilling PCM with drills with undercutting cutting edges]. *Otkrytye informatsionnye i kompiuternye integrirovannye tekhnologii – Open information and computer integrated technologies*, 49, 68-80.
6. Tarasiuk, A.P. (2012). *Vybor ratsionalnykh uslovii rezaniia polimernykh kompozitov, obespechivaiushchikh maksimalnye pokazateli kachestva poverkhnosti* [Selection of rational conditions for cutting polymer composites, ensuring maximum surface quality indicators]. *Mashinobuduvannia: zbirnyk naukovykh prats – Bulletin of SumDU, Series "Technical Sciences"*, 4, 155-161.

7. Korbut, Ye.V. (2018). Osoblyvosti obrobky VPKM protsesom rizanniam [Peculiarities of FPCM processing by the cutting process]. *Promising technologies and devices*. (pp. 82-87).

8. Vnukov, Yu.N., Pavliuchenko, I.N., Papashev, K.O., Sarzhynskaia, A.H. (2006). Osoblyvosti obrobky VPKM protsesom rizanniam [Problems of effective implementation of high-speed cutting processes]. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady – Modern technologies in mechanical engineering, 1*, 43-57.

9. Wang, X., Wang, I. (2004). Problemy effektivnogo vnedreniia protsessov vysokoskorostnogo rezaniia [Investigation on trust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics]. *Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii – Journal Mater.Process.Technol.*, 1486, 239-244.

Отримано 15.05.2024

UDC 621.891

Oleksandr Petrov¹, Ievgen Korbut²

¹PhD Student at the Department at the Machine Design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: petrovsasha69@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>

²PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department at the Machine Design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: korbut1@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1221-4052>

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF DRILLS WITH DISCRETELY MODIFIED WORKING SURFACES TO ENSURE THE QUALITY OF HOLES IN PARTS MADE OF FIBER POLYMER COMPOSITE MATERIALS

The issue of using a cutting tool with modified working surfaces in the form of discrete areas for processing parts made of fiber polymer composite materials (FPCM) has not been studied enough to date.

One of the main parameters that affects the quality of the machined surface of the FPCM part is the temperature that occurs in the cutting zone.

According to scientific research, one of the ways to improve the quality of cutting is to reduce the contact time of the cutting edge with the FPCM material being processed.

The concept proposed in the work is that when using a cutting tool with modified working surfaces in the form of discrete areas with regularly located globules on them, which are cutting elements, due to the discretization of the working surface, the process becomes intermittent cutting, i.e. the contact time of the cutting edge with the surface of FPCM is reduced, which, in turn, allows to improve the quality of the processed surface of the product.

To confirm this hypothesis, a number of experiments were conducted, the results of which showed a decrease in the thickness of the defective layer compared to the recommended tool.

Keywords: cutting process; fiber polymer composite materials (FPCM); discrete structure coverage, surface quality, defective layer.

Fig.: 4. References: 9.

Дмитро Олександрович Пірогов¹, Борис Сергійович Воронцов²

¹аспірант механіко-машинобудівного інституту кафедри технології машинобудування,
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: dimapirohov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-6794-1127>. **Researcher ID:** [KMX-3810-2024](https://orcid.org/0009-0008-6794-1127)

²доктор технічних наук, професор механіко-машинобудівного інституту кафедри технології машинобудування,
Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: voronts@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1174-0971>. **Scopus Author ID:** [57219778103](https://orcid.org/0000-0003-1174-0971)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ Й СИЛУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ ЗАГОТОВОК ІЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ TI-6AL-4V

Через відсутність рекомендацій щодо оброблення заготовок отриманих методом xBeam 3D metal printing досліджено особливості точіння титанового сплаву TI-6AL-4V, а саме впливу збільшення швидкості різання на силу різання, температуру інструмента, локалізацію напружень на різальній кромці інструмента та утворення стружки під час різання із використанням пластини із карбід-вольфрамуму із застосуванням програмного середовища Third Wave AdvantEdge. Показано, що зі збільшенням швидкості різання зростає температура різання, сила різання залишається сталою по всій довжині оброблення, що підтверджує ефект термічного розм'якшення поверхні заготовки. Наведено графіки залежності температури й сил різання від довжини оброблення під впливом швидкості різання, фігури локалізації температур та напружень на вістрі ріжучого інструмента та форма утвореної стружки.

Ключові слова: точіння титанових сплавів; режими різання; вимірювання швидкості та температури різання; сила різання; стружкоутворення.

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Сьогодні сучасна машинобудівна галузь розвивається швидкими темпами. Напрямок розвитку визначається завданням отримання високоякісних компонентів при мінімальній собівартості, мінімальній матеріаломісткості та максимальній продуктивності. Розробка таких технологічних процесів пов'язана з відповідним вибором і створенням більш досконалого технологічного обладнання, механізацією та автоматизацією виробництва, техніко-економічними обґрунтуваннями та проектно-конструкторськими роботами. При цьому завдання полягає в тому, щоб мінімізувати час, необхідний для побудови та впровадження технологічних процесів, і таким чином прискорити використання нового обладнання на етапі виробництва продукції. Одним із таких прогресивних методів, є адитивне виробництво, а саме технологія xBeam 3D metal printing, яка дозволяє отримувати заготовки максимально наближені до готової деталі із використанням титанового дроту та сплавів на його основі, які мають сприятливі фізико-механічні характеристики для експлуатації заготовок та деталей в умовах значного навантаження. Висока міцність та корозійна стійкість, малий коефіцієнт теплового розширення, низька густина та висока питома міцність титанових сплавів, дозволяють значно продовжити термін служби деталі, підвищити її надійність та уникати серйозного зносу всіх складових готового виробу. Однак разом із високими та сприятливими фізико-механічними властивостями, титанові сплави мають певні негативні характеристики, які обумовлюють технологічні проблеми оброблення заготовок різанням, що відкриває нові виклики для інженерів-технологів. Серед яких, розроблення методів та стратегій для ефективного оброблення адитивних заготовок із титанових сплавів на основі варіювання складових режиму різання. Адже будь-яка заготовка отримана за технологією адитивного виробництва потребує кінцевого оброблення, оскільки поверхня деталі або заготовки може не задовольняти конструкторські вимоги на кресленні.

Постановка проблеми. Токарне оброблення титану є надзвичайно складним процесом через фізико-механічні властивості матеріалу. Проблематика виникає при процесі різання заготовок із металевого дроту, отриманих адитивним методом, оскільки фізико-механічні властивості заготовки надрукованої на 3D принтері, може значно відрізнятись від звичай-

ного титанового сплаву, отже процес різання, який характеризується високими температурами різання та тиску в зоні контакту інструмента і заготовки, обумовлює зношення ріжучого інструмента, як наслідок втрата геометричних параметрів ріжучої пластини, зростання сили різання і температури в зоні контакту, що також може бути джерелом утворення вібрацій. У свою чергу, це призводить до зниження продуктивності обробки та погіршення якості поверхні. Матеріал і форма пластини, геометрія ріжучого інструменту і середовище обробки мають значний вплив на продуктивність. Однак, через обмеження фундаментальних знань при обробленні заготовок отриманих адитивними технологіями, існує значна постійна потреба, у тому, щоб деталі піддавалися подальшій механічному обробленні. Тому пошук стратегій для заготовок отриманих за допомогою адитивних технологій та визначення оптимальних значень складових режимів різання, швидкості різання, глибини, швидкості подачі, а також визначення ефективного ріжучого інструменту, його конструкції, геометричних параметрів різальної частини інструменту, форми оброблюваної пластини та додаткових складових, у вигляді охолоджувальної рідини, а також умови оброблення, дозволять сформувати оптимальну стратегію для ефективного оброблення поверхонь виробів для відповідності точності розмірам і шорсткості поверхні, необхідній для еталонного виробу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері механічного оброблення титанового дроту та сплавів на його основі присвячена переважно обробленню титановому сплаву Ti6Al4V, а саме впливу умов різання на якість обробленої поверхні, сили різання, вібрації в системі, знос та стійкість різального інструменту та обладнання, також досліджуються основні проблеми при обробленні титанових сплавів, що ускладнює їх механічне оброблення, або чого слід уникати при процесі різання. Наводяться геометрія інструментів, а також описується вплив інструменту на результати оброблення.

Автори роботи [1] дослідили використання двох різних інструментальних пластин з однаковими умовами експлуатації, а саме вплив стискаючих напружень на заготовку, шорсткість поверхні, твердість та утворення стружки. Зразок оброблений пластиною із покриттям, має вищі стискаючі напруження, кращу шорсткість поверхні, а також має більш стабільний процес деформації стружки, ніж зразок оброблений пластиною без покриття. Твердість зразків не показала значних коливань.

Авторами роботи [2] було вивчено механізм зношування інструменту при обробленні сплавів Ti555.3 та Ti6Al4V. Проаналізовано змінні режиму різання, такі як сили різання, геометрія стружки та знос ріжучого інструмента. Встановлено кореляцію між механічними властивостями матеріалу, зносом інструмента та швидкостями різання. Досліджено, що при точіння сплаву Ti6Al4V утворюється захисний шар із налиплого матеріалу, а розмір шару зменшується зі збільшенням сили різання. При видаленні налиплого шару із зони різання, знос інструменту різко зростає.

У дослідження [3] розглянуто загальні проблеми та труднощі при обробленні титанового сплаву Ti6Al4V ELI. Була висвітлена закономірність між режимами різання та результатом оброблення. Виявлено, що високі діапазони температури різання призводять до погіршення оброблення та погіршення якості поверхні, до зниження точності розмірів і терміну служби ріжучого інструмента. Крім того, більш висока температура прискорює ефекти розм'якшення обробки й викликає зміни в мікроструктурі обробленої поверхні. Подача різання була домінуючим фактором для шорсткості поверхні. Швидкість різання є домінуючим фактором зносу інструменту. Зносом інструменту можна керувати, застосовуючи відповідні умови охолодження для кращої продуктивності різання. Висока сила різання, необхідна для різання твердого матеріалу. При високій температурі відбувається розм'якшення оброблюваного матеріалу, що знижує його міцність на зсув, що полегшує обробку, але водночас ця підвищена температура також прискорює знос інструменту і, як наслідок, погіршує якість поверхні. Виявлено, що висока швидкість різання з низькою швидкістю подачі є найбільш сприятливою комбінацією для сили різання.

Авторами [4; 5] також розглянуто основні проблеми при обробленні титанових сплавів в загальному значенні. Виявлено, що титанові сплави піддаються загартуванню із віком, що впливає на твердість, яка різко зростає, що ускладнює оброблення. Запропоноване використання твердосплавних інструментів із покриттям Al, Si, Ti, N, які забезпечують вищу продуктивність і довший термін служби при швидкості різання до 60 м/хв. Для пластин зі швидкорізальної сталі рекомендується використовувати надвисокі швидкості різання, а також для найгіршого переривчастого різання.

Розроблена стратегія авторами [5] із використанням скінченно-елементної імітаційної моделі для дослідження впливу глибини різання і швидкості різання титанових сплавів, дозволило виявити поведінку між інструментом та заготовкою. Дослідження показало, що швидкість різання є найбільш впливовим параметром, що впливає на розподіл напружень. Збільшення глибини різання призводить до збільшення сили різання через більше знімання матеріалу й товщину стружки, що призводить до збільшення площі контакту. Дослідження підкреслює складну динаміку процесу обробки, де швидкість різання і глибина різання мають різний, а іноді і протилежний вплив на силу різання. Крива напружень стабілізується при більш високих швидкостях різання, що вказує на більш передбачуваний процес обробки. Зі збільшенням глибини різання, а також швидкості різання, збільшується тенденція до руйнування стружки, що своєю чергою руйнує поверхню ріжучого інструмента та погіршує шорсткість поверхні. Зазначається, що при глибині різання в 0,2 мм, суттєво зросла сила різання, при тому, якщо збільшувалась швидкість різання, сила різання зменшувалась. Виявлено, що стабільними швидкостями різання є 80 і 120 м/хв. Критичні точки в процесі різання виявлені при швидкості різання у 40 м/хв та глибині різання 0,05 мм.

Автори [7] вивчили вплив швидкості різання на силу різання, температуру, напруження в інструменті та форму стружки. Виявлено, що зі збільшенням швидкості різання, зростає температура різання, а також виявлено зони ймовірного кратерного зносу. Виявлено стан при якому зі збільшенням швидкості різання, зменшується сила різання, через термічне розм'якшення поверхні заготовки. Досліджено, що зі зменшення сили різання, зменшуються напруження на ріжучому інструменті. Стружка при високих швидкостях різання відривається, у той час як при низьких утворюється суцільна.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз досліджень показав, що результати досліджень формуються на основі варіювання складовими режиму різання, швидкістю, подачею та глибиною різання, а також геометричними параметрами інструменту та матеріалом ріжучої частини. Оброблення проводяться для титанового сплаву Ti6Al4V та його варіацій. Реалізація ефективної стратегії для токарного оброблення, все ще актуальна і значною мірою залежить від подальшого пошуку ефективних умов різання, особливо для заготовок отриманих із металевого дроту із використанням адитивних технологій, оскільки фізико-механічні властивості матеріалу, можуть значно відрізнятися для кожної окремої заготовки.

Метою статті є визначення впливу швидкості різання на температуру в процесі різання, силу різання, характер утворення напружень в інструменті та характер утворення стружки під час різання заготовки із титанового сплаву Ti6Al4V із використанням твердосплавної ріжучої пластини із карбід вольфраму.

Виклад основного матеріалу. Титанові сплави дуже популярні в аерокосмічній, автомобільній, оборонній та біомедичній галузях завдяки своїй високій питомій міцності, легкій вазі, біосумісності та корозійній стійкості. Однак виробництво заготовок на основі титану є дуже дорогим порівняно з іншими конструкційними металами, такими як сталь і алюміній, і пов'язане з дуже великими витратами часу.

Тому були розроблені процеси адитивного виробництва, що дозволяють виготовляти металеві деталі, які важко піддаються механічній обробці, скорочуючи таким чином час на підготовку і втрати матеріалу, а також значно підвищуючи продуктивність. Технологія 3D-друку металів xBeam вирішує багато технічних та економічних проблем адитивного

виробництва. Використання профільованих електронних пучків як джерела нагріву, титанового дроту як основного матеріалу та спеціальних низьковольтних газорозрядних електронних гармат, що генерують електронні конічні порожнисті пучки, дозволяє виготовляти порожнини без високого проникнення в матеріал, рівномірно нагрівати матеріал, зберігати властивості та структуру титанового сплаву, зменшувати залишкові напруження та деформації, досягати швидкої кристалізації та охолодження [8].

Крім того, ця технологія мінімізує фінішні операції, забезпечуючи достатньо високі геометричні параметри виробу завдяки контрольованому нагріванню, високій продуктивності плавлення і подачі дроту з пошаровим нанесенням матеріалу. Дослідження показали, що час виготовлення готової деталі за цією технологією становить 130 хвилин, порівняно з 10-14 тижнями, які витрачають конкуренти, що використовують традиційне лиття для виробництва аналогічної деталі.

Таким чином, технологія дозволяє швидко й ефективно виготовляти заготовки з титанових сплавів зі збереженням задовільних механічних властивостей, міцності і пластичності, а витрата витратних матеріалів є високою, що дозволяє отримувати заготовки, максимально наближені до кінцевого продукту з мінімальними виробничими витратами [9].

Попри це, вирішення проблем різання залишається активним напрямком досліджень, оскільки отримані заготовки потребують подальшої обробки, щоб забезпечити виконання вимог до розмірів і шорсткості поверхні. Рекомендації щодо використання технології xBeam 3D в поєднанні з операціями різання відсутні, тому планується проведення досліджень та експериментів з режимами різання для досягнення заданої необхідної шорсткості та точності. Щоб уникнути помилок у подальших експериментах, слід звернути увагу на деякі характеристики обробки заготовок з титанових сплавів.

Процес різання широко використовується у виробництві для забезпечення як попереднього, так і остаточного оброблення заготовки для отримання кінцевої деталі. Тому досягнення гарної якості поверхні, є головною метою даного процесу. На сьогодні процес токарного оброблення досліджується із використанням методу скінченних елементів, який дозволяє дослідити складні проблеми та одержати кількісні рішення. Під час точіння металу, дослідження параметрів зносу інструменту, сил різання, температури в процесі різання є складним та коштовним. Тому метод скінченних елементів дозволяє передбачити необхідні результати на етапі проектування за допомогою вибору необхідних параметрів різання, матеріалу, ріжучого інструменту, що в перспективі запобігатиме зайвим матеріальним витратам, а також дозволить на етапі тестування отримати хорошу якість поверхні і скорегувати знос ріжучого інструменту варіюючи параметрами процесу різання.

Для моделювання процесу точіння використовується середовище Third Wave AdvantEdge та вихідні дані (табл. 1) для моделювання процесу. Як заготовку обрано титановий сплав Ti6Al4V, який є максимально наближений до металевого дроту, який використовується при виробництві заготовок за технологією xBeam 3D metal printing, ріжуча пластина та рекомендовані режими оброблення згідно з каталогом Sandvik Coromat [10].

Таблиця 1 – Вихідні параметри для моделювання процесу токарного оброблення

Параметри різання	Значення
1	2
Матеріал заготовки	Ti6Al4V
Матеріал ріжучої пластини	WC (Карбід вольфраму)
Форма пластини	C – квадратна
Задній кут, °	N (0°)
Клас точності	M
Конструктивні особливості	G
Рекомендовані каталожні режими різання для обраної пластини	
Базова пластина	CNMG 12 04 04 – G13
Швидкість різання, м/хв	45, 55,65
Подача, мм/об	0,2

Закінчення табл. 1

1	2
Глибина різання, мм	1
Температура середовища, °C	20
Заготовка	
Довжина, мм	40
Висота, мм	20
Експериментальна довжина оброблення, мм	10
Форма пластини	

Джерело: розроблено авторами.

У процесі моделювання точіння при рекомендованих каталогом [10] режимах різання, було визначено розподіл температури (рис. 1, 2, 3). За допомогою аналізу в програмному забезпеченні Third Wave AdvantEdge, визначено, що зі збільшенням швидкості різання зростає температура, відповідно зростає швидкість деформації. Збільшення температури відбувається поступово в міру оброблення заготовки. Максимальна температура спостерігається в області контакту ріжучої пластини, ближче до вістря інструменту, де виникає ймовірність налипання стружки, і в результаті може відбуватись викришування або кратерний знос інструменту в області максимальної температури.

Сили різання, які виникали при процесі обчислення показані на рис. 1, 2, 3 згідно зі збільшенням швидкості різання. Зі збільшенням швидкості різання спостерігається зменшення сил різання, а також її нормалізація до сталих значень без пікових показників. Такий стан пов'язаний із високою температурою, що виникає на межі інструмент-стружка при високих швидкостях різання. Температура в процесі різання зростає, що викликає термічне розм'якшення поверхні заготовки, що своєю чергою знижує міцність матеріалу на зсув і полегшує процес оброблення.

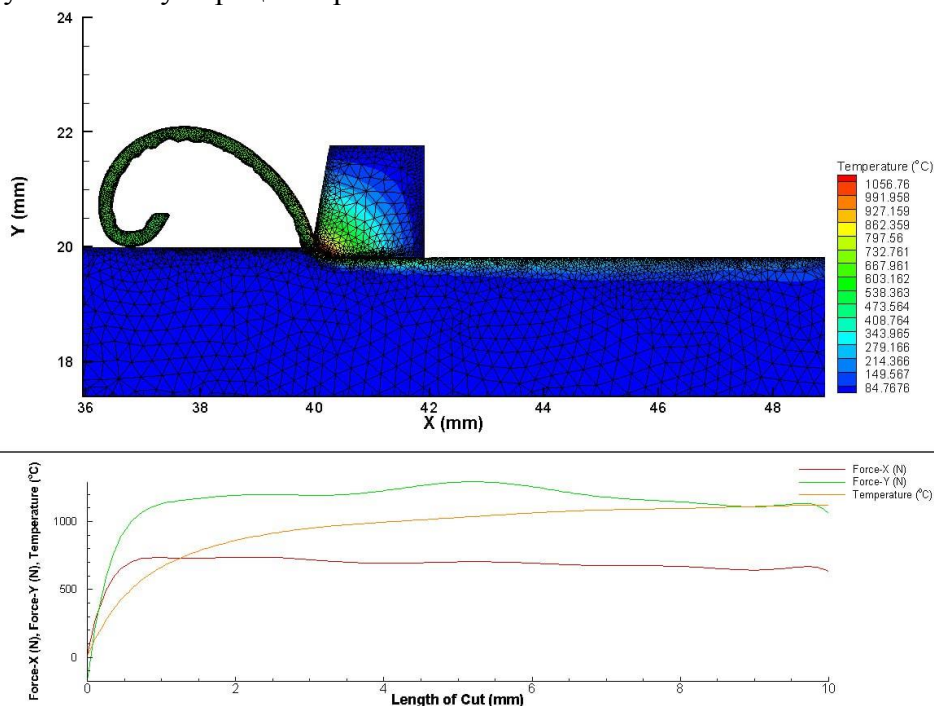


Рис. 1. Перша варіація оброблення для швидкості 45 м/хв, глибина 1 мм, подача 0,2 мм/об, без застосування мастильно-охолоджуючої рідини
Джерело: розроблено авторами.

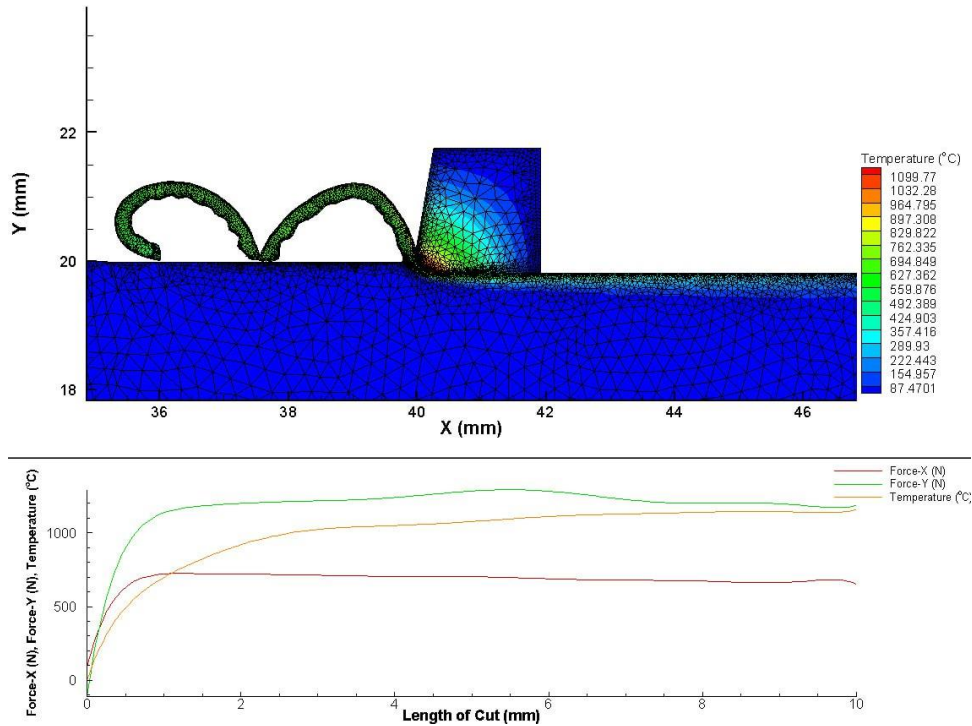


Рис. 2. Друга варіація оброблення для швидкості 55 м/хв, глибина 1 мм, подача 0,2 мм/об, без застосування мастильно-охолоджуючої рідини
Джерело: розроблено авторами.

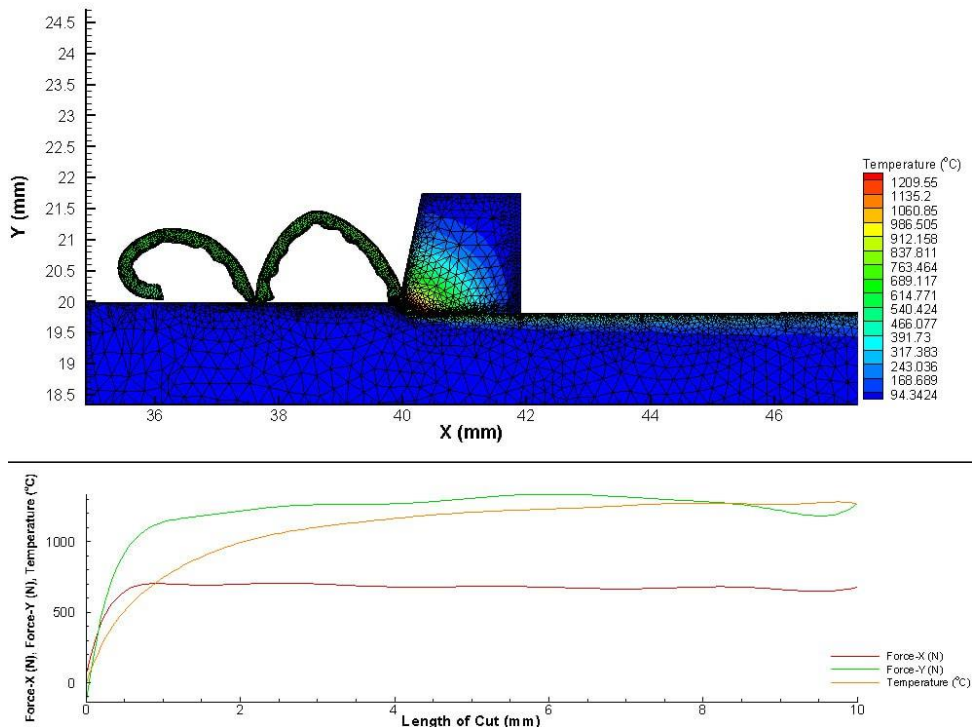


Рис. 3. Третя варіація оброблення для швидкості 65 м/хв, глибина 1 мм, подача 0,2 мм/об, без застосування мастильно-охолоджуючої рідини
Джерело: розроблено авторами.

Одним з основних факторів, який впливає на продуктивність ріжучого інструменту є вплив швидкості на температуру та напруження на вістрі ріжучого інструменту, які продемонстровано на рис. 4, 5 відповідно. Як показано на рис. 4, температура зростає зі

збільшенням швидкості різання, але характер і область нагрівання не змінюється. Підвищення температури призведе до термічного розм'якшення заготовки. Таким чином, стружка буде відокремлюватись від заготовки, і процес різання полегшиться.

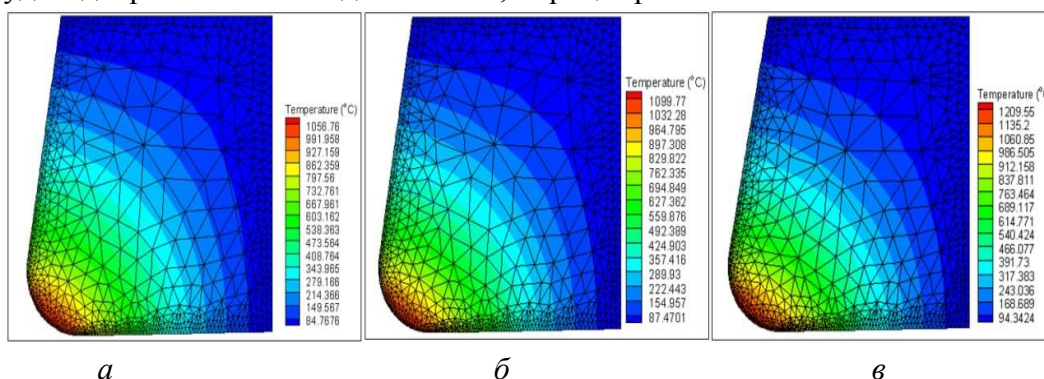


Рис. 4. Локалізація температури на вістрі ріжучого інструменту:

a – $V = 45$ м/хв; *б* – $V = 55$ м/хв; *в* – $V = 65$ м/хв

Джерело: розроблено авторами.

Напруження на ріжучому інструменті розташовані на передній поверхні пластини, вглиб на 1 мм від ріжучої кромки та їх зміна пов'язана зі збільшенням швидкості різання, чим більша швидкість різання, тим більші напруження виникають. Максимальні значення напруження не змінюються, але характер зсуву і їх зона зростає, що показано на рис. 5.

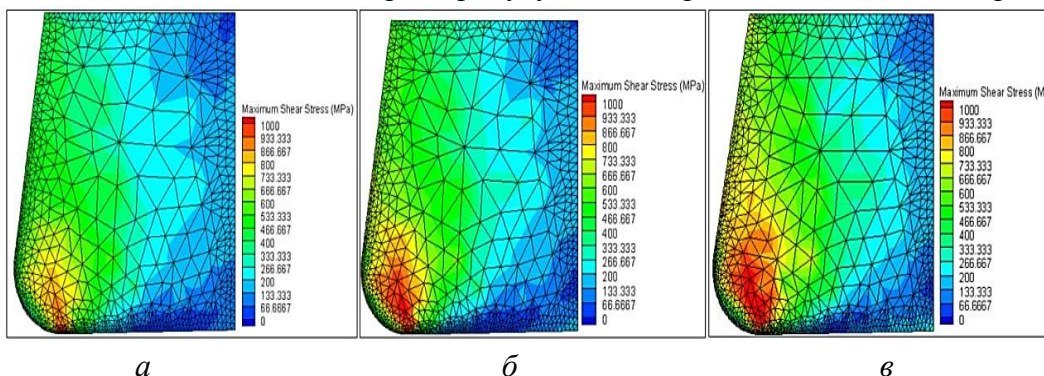


Рис. 5. Локалізація напружень на вістрі ріжучого інструменту.

a – $V = 45$ м/хв; *б* – $V = 55$ м/хв; *в* – $V = 65$ м/хв

Джерело: розроблено авторами.

Також, як було зазначено вище, зі збільшенням швидкості різання, відбувається збільшення температури, при цьому виникає ефект термічного розм'якшення заготовки. Таким чином, стружка починає відокремлюватися від заготовки, і виникає переривчаста стружка (рис. 6, б), що утворюється при вищих швидкостях різання та суцільна стружка при нижчих швидкостях різання. (рис. 6, а).

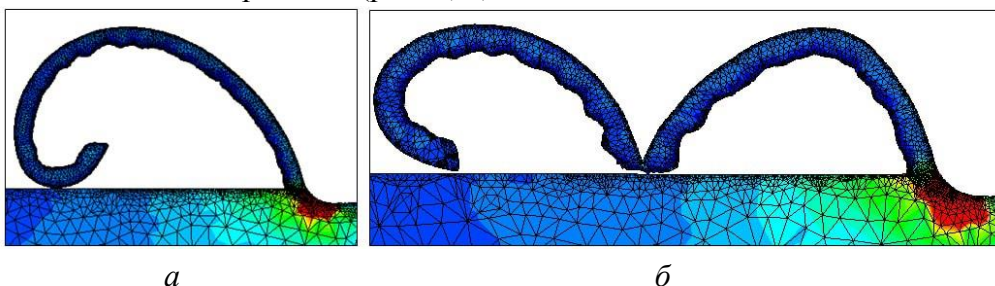


Рис. 5. Утворення стружки:

a – суцільна; *б* – переривчаста

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. У цьому дослідженні проаналізовано та продемонстровано вплив швидкості різання на температуру в зоні різання, силу різання, характер утворення напружень на передній поверхні ріжучої пластини та характер утворення стружки. Виявлено, що зі збільшенням швидкості, зростає температура на ріжучій пластині. Найвища температура формується в зоні контакту ріжучої пластини із заготовкою, де є ймовірність виникнення налипання стружки і відриву її із формування кратера. Сила різання зі збільшенням швидкості різання, поступово стабілізується і зменшується, що пов'язано із термічним ефектом розм'якшення заготовки. Розподіл пікових значень напружень на передній поверхні ріжучої пластини збільшується вглиб інструменту. Досліджено, що суцільна стружка утворюється при низьких швидкостях різання, у той час як при високих швидкостях різання стружка відривається внаслідок вищих температур.

Отримані результати можуть бути корисними при подальших дослідженнях процесу різання і пошуку оптимального діапазону режимів різання, що дозволяють оцінити як знос різального інструменту, його передчасний вихід із ладу, так і ефективність процесу різання. Адекватне розуміння оброблюваності титанових сплавів має важливе значення для забезпечення ефективного оброблення.

Список використаних джерел

1. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity / O. Oyelola, P. Crawforth, R. M'Saoubi, A. T. Clare // *Procedia Cirp*. – 2016. – Vol. 45. – Pp. 119-122.
2. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3) / P. J. Arrazola, A. Garay, L. M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, F. Le Maître // *Journal of materials processing technology*. – 2009. – Vol. 209(5). – Pp. 2223-2230.
3. Machining of Ti-6Al-4V ELI alloy: A brief review / S. Roy, K. K. Joshi, A. K. Sahoo, R. K. Das // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 390, № 1. – Pp. 012-112.
4. Machining of Titanium Alloys: A Review / Moaz H. Ali, Basim A. Khidhir, Bashir Mohamed, R. Balasubramanian, A.A. Oshkour // *Student Conference On Research And Development (SCORED 2011) 2nd November 2011, Administration Gallery, UNITEN*. – Vol. 204(12). DOI:10.1243/PIME_PROC_1990_204_047_02.
5. Machado, A. R. Machining of titanium and its alloys: a review / A. R. Machado, J. Wallbank // *Journal of Engineering Manufacture*. – 1990. – Vol. 204(1). – Pp. 53-60.
6. Pal, S. Finite element investigation of cutting speed effects on the machining of Ti6Al4V alloy / S. Pal, X. Velay, W. Saleem // *Discover Mechanical Engineering*. – 2024. – Vol. 3(1).
7. Gök, K. K. Finite element modeling as three dimensional of effect of cutting speed in turning process / K. K. Gök, A. Gök, M. B. Bilgin // *Journal of Engineering and Fundamentals*. – 2014. – Vol. 1(1). – Pp. 11-22.
8. New possibilities of additive manufacturing using xBeam 3D Metal Printing technology / D. V. Kovalchuk, V. I. Melnik, I. V. Melnik, B. A. Tugaj // *The Paton Welding J*. – 2017. – Vol. 12. – Pp. 16-22.
9. XBeam 3D Metal Printing technology on the path to industrial production / D. V. Kovalchuk, V. G. Melnik, I. V. Melnik, B. A. Tugaj // *Сучасна електрометалургія*. – 2020. – № 3. – С. 30-34.

References

1. Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R., & Clare, A. T. (2016). Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity. *Procedia Cirp*, 45, 119-122.
2. Arrazola, P. J., Garay, A., Iriarte, L. M., Armendia, M., Marya, S., & Le Maître, F. (2009). Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3). *Journal of materials processing technology*, 209(5), 2223-2230.
3. Roy, S., Joshi, K. K., Sahoo, A. K., & Das, R. K. (2018, July). Machining of Ti-6Al-4V ELI alloy: A brief review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 390, No. 1, p. 012112). IOP Publishing.

4. Ali, Moaz H. & Khidhir, Basim & Mohamed, Bashir & Balasubramanian, R & Ataollahi Oshkour, Azim. (2011). Machining of Titanium Alloys: A Review. B Student Conference on Research and Development. *The Institution of Mechanical Engineers Part B-journal of Engineering Manufacture*.

5. Machado, A. R., & Wallbank, J. (1990). Machining of titanium and its alloys—a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 204(1), 53-60.

6. Pal, S., Velay, X., & Saleem, W. (2024). Finite element investigation of cutting speed effects on the machining of Ti6Al4V alloy. *Discover Mechanical Engineering*, 3(1), 1.

7. Gök, K., Gök, A., & Bilgin, M. B. (2014). Finite element modeling as three dimensional of effect of cutting speed in turning process. *Journal of Engineering and Fundamentals*, 1(1), 11-22.

8. Kovalchuk, D. V., Melnik, V. I., Melnik, I. V., & Tugaj, B. A. (2017). New possibilities of additive manufacturing using xBeam 3D Metal Printing technology. *The Paton Welding J*, 12, 16-22.

9. Kovalchuk, D. V., Melnik, V. G., Melnik, I. V., & Tugai, B. A. (2020). XBeam 3D Metal Printing technology on the path to industrial production. *Suchasna elektrometalurhiia*, 2020(3), 30–34.

Отримано 02.06.2024

UDC 621.91.01

Dmytro Pirohov¹, Borys Vorontsov²

¹PhD student, Institute of Mechanical Engineering, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: dimapirohov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-6794-1127>. **ResearcherID:** [KMX-3810-2024](https://orcid.org/0009-0008-6794-1127)

²Dr. Technical Science, Professor, Institute of Mechanical Engineering, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vorontsov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1174-0971>. **Scopus Author ID:** [57219778103](https://orcid.org/0000-0003-1174-0971)

INVESTIGATION THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED ON CUTTING FORCES AND TEMPERATURE IN TURNING OF TITANIUM ALLOY TI-6AL-4V

xBeam 3D metal printing is the most modern method of additive technologies for obtaining blanks by using of titanium alloy Ti-6AL-4V metal wire as a base material. The lack of sufficient numbers of studies on the turning blanks obtained by additive technologies prompted the investigation of turning features in particular the influence of increasing cutting speed on the cutting forces, tool temperature, and stress localization on the cutting edge and chip formations by using Third Wave AdvantEdge for simulations.

In metal turning, the study of parameters such as tool wear, cutting forces and temperature during the cutting process is complex and expensive. Therefore, computer simulation can be used to predict the required results by selecting the right cutting parameters, materials and cutting tools during the design phase, thus avoiding unnecessary material costs in the future.

This article presents the results of a study using the AdvantEdge simulation. A square insert with a 0° back angle made of a cemented tungsten carbide (WC) was selected as the cutting tool. The cutting mode parameters were determined analytically using a catalogue. In this study, the feed rate and depth of cut were not changed, and the cutting speed was set in the range of 45 m/min, 55 m/min and 65 m/min. The feed rate was 0.2 mm/rev and the depth of cut was 1 mm. The machining length was 10 mm. Also, the paper contains graphs of cutting forces and tool temperature versus the length of cutting under the influence of increasing cutting speed. The results show that as the cutting force increases, the cutting temperature increases accordingly, but the cutting force remains unchanged and tends to stable values, which confirms the effect of workpiece softening, which facilitates material removal. The distribution of peak stress values on the front surface of the insert increases deeper into the tool. It was found that continuous chips are formed at low cutting speeds, while at high cutting speeds, chips are torn off due to higher temperatures.

The results obtained can be used to research of the cutting process and search for the optimal range of cutting modes, which allows evaluating the wear of the cutting tool, its premature failure, and the efficiency of the cutting process.

Keywords: turning, machining; Ti-6Al-4V; cutting speed; calculation of cutting force and tool temperature; cutting modes.

Fig.: 6. **Table:** 1. **References:** 9.

Ольга Олександрівна Набережна¹, Сергій Володимирович Губарєв²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики конденсованого стану

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: o.naberezhnaya@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1302-4098>

ResearcherID: [T-2024-2019](https://orcid.org/0000-0003-1302-4098). Scopus Author ID: [57189904509](https://orcid.org/0000-0003-1302-4098)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики конденсованого стану

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: gubarev196@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8607-9394>. Scopus Author ID: [56976192600](https://orcid.org/0000-0001-8607-9394)

ВПЛИВ ВМІСТУ ГРАФІТУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФІТОПЛАСТІВ НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ

У роботі представлені результати досліджень графітопластів на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2. Такі композиції були отримані методом компресійного пресування з різним вмістом графіту від 10 до 60 мас%. в полімерному в'язучому. Основним напрямом дослідження було визначення термічного коефіцієнта лінійного розширення та визначення термостійкості за допомогою методу термогравіметричного аналізу (ТГА), а також визначення механізмів та кінетичних параметрів з використанням методу Коатса-Редферна. Встановлено, що введення 30...60 мас. % графіту в полімерну матрицю підвищує термостійкість графітопластів у 1,02...1,22 рази в порівнянні з фенілоном. Термічний коефіцієнт лінійного розширення зі збільшенням концентрації графіту в полімерній матриці поліщується на 45-48 % у разі підвищення температури від 423 до 523 К. Порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей отриманих графітопластів на основі фенілону з наявним аналогом показав, що отримані матеріали на основі фенілону з концентрацією наповнювача 10-20 мас.% переважають відомий конструкційний антезіт за міцністю в 1,14-1,48; ударною в'язкістю 2-5,2; твердістю 1,03-1,3 разів, при одночасному зниженні питомої ваги до 25 %.

Ключові слова: графіт, графітопласт, фенілон термічний коефіцієнт лінійного розширення, термостійкість, фізико-механічні властивості.

Рис.: 2. Табл.: 3. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні з пластиків виготовляють сотні тисяч технічних виробів, від дрібних кнопок до громіздких агрегатів: автомобільні шестерні, підшипники потужних прокатних станів, вагонетки, корпуси автомобілів, човни, ткацькі човники, найточніші деталі оптичних приладів, телефонні апарати, скло, що не б'ється, для літаків, деталі хімічної апаратури, що перевершують за стійкістю золото і платину. До складу більшості пластиків додають наповнювачі, різні за своєю хімічною природою, що в свою чергу, надає виробам з таких матеріалів міцності, твердості, теплостійкості та інших спеціальних властивостей [1].

Введення графіту надає пластикам високої хімічної і термічної стійкості. Теплостійкість варіюється від 343 до 573 К, де основну роль відіграє обрана матриця. Однак все ж таки до недоліків відомих графітопластів належить не надто високі показники теплофізичних властивостей [2].

Постановка проблеми. Різноманіття матеріалів з вмістом графіту та варіювання їх складів, широта сфер використання і складність спектра їх властивостей, як і раніше викликають інтерес до них з боку дослідників і промисловців. Особливо гостро стоїть питання визначення довговічності без ушкодження деталей, адже графітопласти застосовують для виготовлення різних фільтрів, поршневих кілець, ущільнювачів, ливарних форм, вкладишів, підшипників ковзання та ін. [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Термопласти, певною мірою, вже досягли своєї межі міцності, термостійкості та зносостійкості [2], тому важливе значення має модифікування структури полімерної матриці наповнювачем. Істотної зміни властивостей композиційних полімерних матеріалів на основі термопластичних сполучних досягають за рахунок реорганізації надмолекулярної структури полімеру [3]. Вуглеграфітові наповнювачі характеризуються високими хімічною стійкістю та теплостійкістю, невеликими щільністю (1,22...2,25 г/см³) та пористістю (20...30 %), розвиненою поверхнею частинок [1; 3]. Графітопласти такого типу можна застосовувати для виготовлення конструкційних

деталей складної форми [2]. При додаванні графіту пластики мають високу хімічну і термічну стійкість. Проте через вищезгадані недоліки створюють нові склади з підбором матриці, яка б задовольнила ці потреби. У роботі [4] було досліджено термічний коефіцієнт лінійного розширення графітопластів на основі фенілону, що дало змогу оцінити обраний метод формування композитів та поєднання компонентів. За способом формування у виробі графітопласти поділяють на два типи: такі, що формуються у виробі методом пресування при підвищених температурах та тисках, та графітопласти, які отримують методом холодного лиття. Відомим представником першого типу є графітопласти на основі фенолформальдегідної смоли та штучного графіту – антегіт марки АТМ-1 [5]. Антегіти зарекомендували себе як антифрикційні самозмащувальні матеріали, недоліками яких є низькі показники фізико-механічних властивостей.

Тому метою даної роботи було дослідження термостійких графітопластів на основі фенілону та визначення їх теплофізичних, термічних та фізико-механічних властивостей.

Об'єкт та предмет дослідження. Як в'язучий використовували термостійкий ароматичний поліамід – фенілон С-2, який наповнювали сріблястим графітом у масовому співвідношенні, вказаному в табл. 1. Формування композицій у виробі здійснювали методом сухого змішування в обертовому електромагнітному полі у присутності нерівноосних ферромагнітних частинок з подальшим їх видаленням методом магнітної сепарації. Після чого зразки завантажували в пресформу й піддавали компресійному пресуванню.

Таблиця 1 – Склади композицій

В'язуче	Вміст в'язучого, мас. %	Наповнювач	Вміст наповнювача, мас. %
Ароматичний поліамід фенілон С-2	100	Сріблястий графіт	-
	90		10
	85		15
	80		20
	70		30
	60		40
	50		50
	40		60

Методи дослідження. Термічну стійкість вивчали за допомогою методу термогравіметричного аналізу (ТГА), а також визначення механізмів та кінетичних параметрів із використанням методу Коатса-Редферна.

ТГА аналізу піддавали композити на основі фенілону С-2 (ТУ 6-05-221-101-71), наповненого 10...60 мас. % графітом марки ГС-2. Термічну деструкцію одержаних зразків вивчали на дериватографі Q-1500Д системи Ф. Паулік, Й. Паулік та Л. Ердей фірми МОМ (Угорщина). Випробування проводили у спеціальних керамічних тиглях на повітрі в інтервалі температур 298...873 К. Швидкість підйому температури – 10 К/хв, як еталонну (інертну) речовину використовували Al₂O₃, навішування речовини – 100 мг. Чутливість методів ДТГ та ДТА становила 1/5 та 1/3 відповідно.

Для визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) отримані зразки досліджували згідно ГОСТ 15173-70 на дилатометрі ДКВ-5АМ в інтервалі температур 293-1173 К. Кількість зразків для випробування кожної партії матеріалу становила не менш десяти. Середній ТКЛР – α (К⁻¹) досліджуваного зразка розраховували за формулою:

$$\alpha = \frac{\Delta l_n + \Delta l_H}{l_0} \cdot \frac{1}{T_{i+1} - T_i} + \alpha^k,$$

де Δl_n – різниця відхилення стрілки потенціометра по осі Y в інтервалі температур $T_{i+1} - T_i$, мм;

Δl_H – відхилення від нуля приладу в інтервалі температур $T_{i+1} - T_i$, мм;

l_0 – довжина зразка при початковій температурі $T = 293$ К, мм;

α^k – ТКЛР кварцового скла в інтервалі температур $T_{i+1} - T_i$, К⁻¹.

Дослідження фізико-механічних властивостей проводили згідно з чинними стандартами для пластмас.

Результати та їх обговорення. Аналіз результатів ДТА-кривих фенілону та графітопластів на його основі показав [6], що в інтервалі температур 273...623 К спостерігається ендотермічна ділянка з поступовим зменшенням маси (3...6 %), яка супроводжується виділенням вологи. Термодеструкція фенілону починається при 723 К, у той час як для графітопластів із вмістом наповнювача 10...20 мас.% – при температурі 803 К, що містять 30...60 мас.% графіту – спостерігається при 848 К (термостабільність збільшується на 125 градусів, порівняно з вихідним фенілоном).

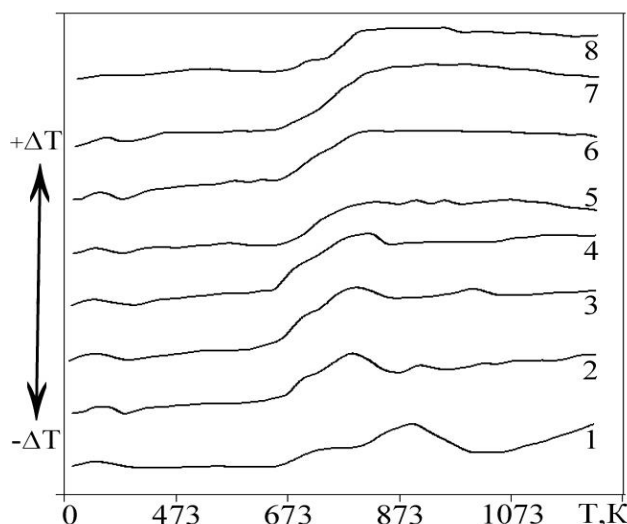


Рис. 1. ДТА-криві фенілону С-2(1) та графітопластів на його основі із вмістом графіту: 2-10; 3-15; 4-20; 5-30; 6-40; 7-50; 8-60 мас. %

Введення 30...60 мас. % графіту в полімерну матрицю підвищує термостійкість графітопластів в 1,02...1,22 рази в порівнянні з ненаповненим фенілоном (табл. 2). Ймовірно, зростання термічних показників свідчить про процеси структуризації та інтенсивності механізмів взаємодії між фенілоном та наповнювачем, тобто зшивання макромолекул фенілону між собою та з частинками графіту.

Таблиця 2 – Термостійкість і кінетичні параметри фенілону та графітопластів на його основі з різним вмістом наповнювача

Вміст графіту, мас. %	0	10	15	20	30	40	50	60
T ₁₀	699	703	708	711	718	743	753	792
T ₂₀	757	773	778	784	803	836	856	854
T ₃₀	802	833	842	851	883	922	941	915
T ₄₀	853	885	901	913	953	1003	1034	1011
T _{Vmax}	689	702	708	699	695	704	703	704
Енергія активації, кДж/моль	203	174	158	143	131	106	102	99
Коеф. кореляції	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00

Примітка: T₁₀, T₂₀, T₃₀, T₄₀ – температури, К; 10, 20, 30, 40 % втрати маси.

За результатами термічного аналізу визначено механізми та кінетичні параметри процесу термічної деструкції досліджуваних матеріалів з використанням методу Коатса-Редферна [6]. Виявлено, що введення графіту зменшує енергію активації процесу термодеструкції майже вдвічі. Це дає можливість підвищити технологічні параметри переробки композиційних полімерних матеріалів, які обмежені вузьким інтервалом між температурами плинності й термодеструкції фенілону С-2.

Що стосується термічного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) [4] полімеру в твердому стані, то він залежить від температури, поступово підвищуючись з її збільшенням. У склоподібному стані показники ТКЛР мають вищі значення, ніж у розплаві або у в'язкоподібному полімері. Саме температура склування впливає на показники ТКЛР. Це відбувається внаслідок перетину точки склування, де виникають структурні перетворення, які впливають на розширення компонентів композиції. А вже подальше зменшення коефіцієнта розширення спостерігається нижче температури переходу в склоподібний стан.

Експериментально встановлено, що температура склування для чистого фенілону С-2-543 К, теоретичне її значення розраховували за теоремою Вейланда, Хофтицера і Ван Кревелена [7] за формулою:

$$T_g = \frac{Y_g}{Z},$$

де Y_g – модульна функція переходу в склоподібний стан, Z – число атомів вздовж ланцюга головних валентностей в межах одного мономерного звена; похибка експериментального та теоретичного значень становить 8 %.

Аналіз результатів ТКЛР, які наведені на рис. 2, показав, що введення графіту неоднозначно впливає на значення ТКЛР графітопластів [4; 8]. В інтервалі температур 298–373 К спостерігається підвищення ТКЛР відповідно зі збільшенням концентрації наповнювача від 10 до 20 мас. %. Після чого показники ТКЛР поступово знижуються на 23–30 % при підвищенні температури до 450 К, це свідчить про мінімальну усадку готових виробів.

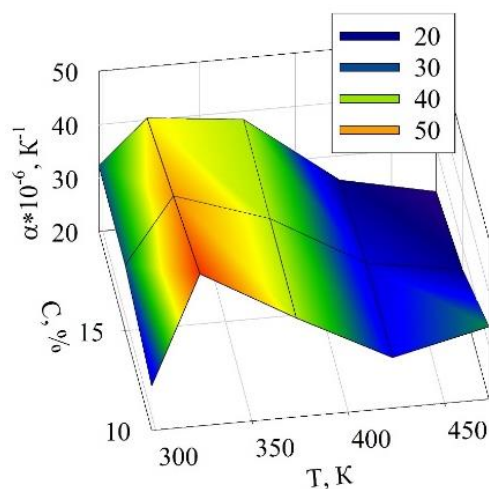


Рис. 2. Залежність температурного коефіцієнта лінійного розширення від температури графітопластів на основі фенілону

Проаналізувавши отримані результати, видно, що зі збільшенням концентрації графіту в полімерній матриці термічний коефіцієнт лінійного розширення поліпшується на 45–48 % у разі підвищення температури від 423 до 523 К.

Оскільки одним із найвідоміших представників графітопластів є антегіт марки АТМ-1 (на основі фенолформальдегідної смоли та штучного графіту), то доцільно буде провести порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей отриманих графітопластів на основі фенілону з існуючим аналогом [5; 8]. Аналіз результатів фізико-механічних досліджень показав, що отримані графітопласти на основі фенілону з концентрацією наповнювача 10–20 мас. % переважають відомий конструкційний антегіт за міцністю в 1,14–1,48; ударною в'язкістю 2–5,2; твердістю 1,03–1,3 раза, при одночасному зниженні питомої ваги до 25 % (табл. 3). Це свідчить про перспективність впровадження таких матеріалів як деталей конструкційного призначення.

Таблиця 3 – Фізико-механічні властивості графітопластів

Показники	АТМ-1 [5]	Графітопласти на основі фенілолу, наповнені графітом, мас. %		
		10	15	20
Питома вага, г/см ³	1,8	1,45	1,48	1,53
Межа міцності при стисненні, МПа	120	177	161	137
Ударна в'язкість, кДж/м ²	3,5	18,3	15,4	6,9
Твердість за Роквелом, HR _a	62	78,1	78,5	80,1

На основі отриманих результатів були розроблені втулки з графітопласту для виготовлення деталей поршневих компресійних установок, виготовлених з поліаміду фенілон С-2 армованого сріблястим графітом.

Експериментальні деталі – елементи сальникових ущільнень штоків були встановлені на поршневі компресійні установки 4ГМ10 – 4/46С та відпрацювали протягом 986 годин. За час випробувань зауважень з експлуатації не було, експериментальні деталі мають кращі експлуатаційні характеристики: теплостійкість і міцність, які перевищують відомі полімерні аналоги. Під час перевірки технічного стану встановлено, що експериментальні деталі мають незначне зношування, яке знаходиться в допустимих межах. У зв'язку з технічною придатністю до експлуатації експериментальні втулки продовжують досліджувати.

Висновки. Отримані графітопласти на основі фенілолу мають значні переваги перед чистим фенілоном та існуючими аналогами за комплексом досліджених характеристик. А саме у графітопластах на основі фенілолу спостерігалось підвищення термічної стійкості в 1,2 раза, зниження термічного коефіцієнту лінійного розширення в 1,45 раза при підвищенні температури до 523 К та показників фізико-механічних властивостей: міцності в 1,48; ударної в'язкості в 5,2; твердості в 1,3 раза, при одночасному зниженні питомої ваги в 1,25 рази. Це дозволило провести ряд вдалих промислових випробувань з використанням деталей на базі створеного графітопласту. У зв'язку з технічною придатністю до експлуатації експериментальні втулки продовжують досліджувати.

Список використаних джерел

1. Siow, K. S. Pengelupasan grafit untuk mengkomersilkan teknologi grafin / K. S. Siow // Sains Malays. – 2017. – Т. 46. – С. 1047-1059.
2. Abdullah, N. M. Synergistic influence of graphite on biopolymer composites properties / N. M. Abdullah, A. Z. M. Rus, M. F. L. Abdullah // J. Teknol. – 2015. – Т. 77. – С. 11-19.
3. Barletta M. et al. High performance composite coatings on plastics: UV-curable cycloaliphatic epoxy resins reinforced by graphene or graphene derivatives / Barletta M. et al. // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Т. 272. – С. 322-336.
4. Терентієва, О. А. Вплив вмісту графіту на температурний коефіцієнт лінійного розширення композитів на основі фенілолу / О. А. Терентієва; наук. кер. О. І. Буря, О. О. Набережна // Наукові розробки молоді на сучасному етапі : тези доповідей XVII Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів (26-27 квітня 2018 р., Київ). – Київ : КНУТД, 2018. – Т. 2 : Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. – С. 605-606.
5. Zuru, A. A. A new technique for determination of the possible reaction mechanism from nonisothermal thermogravimetric data / A. A. Zuru, R. Whitehead, D. L. Criffiths // Thermochim. Acta. – 1990. – 164. – Р. 285-305.
6. Мелехов, Р. К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання / Р. К. Мелехов, В. І. Похмурський. – Київ : Наук. думка, 2003. – 374 с.
7. Thermal resistance of graphite plastics based on aromatic polyamide / A. Burya, Ye. Yerriomina, O. Naberezhnaya, N. Arlamova // American Journal of Analytical Chemistry. – 2018. – V. 9. – Pp. 331-339.
8. Synthetic polymer-polymer composites / ed. by D. Bhattacharyya, S. Fakirov. – Munich : Hanser Publishers, 2012. – 819 p.

References

1. Siow, K.S. (2017). Pengelupasan grafit untuk mengkomersilkan teknologi grafin. *Sains Malays.*, 46, 1047-1059.

2. Abdullah, N. M., Rus, A. Z. M., & Abdullah, M. F. L. (2015). Synergistic influence of graphite on biopolymer composites properties. *J. Teknol*, 77, 11-19.
3. Barletta, M., Vesco, S., Puopolo, M., & Tagliaferri, V. (2015). High performance composite coatings on plastics: UV-curable cycloaliphatic epoxy resins reinforced by graphene or graphene derivatives. *Surface and Coatings Technology*, 272, 322-336.
4. Terentiyeva, O.A., Burya, O.I., Naberezhnaya, O.O. (2018). Vplyv vmistu hrafitu na temperaturnyy koefitsiyent liniynoho rozshyrennya kompozytiv na osnovi fenilonu [The effect of graphite content on the temperature coefficient of linear expansion of composites based on phenylone]. *Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi: XVII Vseukrainska naukova konferentsiia molodykh vchenykh ta studentiv – Scientific developments of youth at the current stage: XVII All-Ukrainian scientific conference of young scientists and students* (Vol. 2, pp. 605-606). Kyiv National University of Technology and Design.
5. Zuru, A.A., Whitehead, R., & Griffiths, D. L. (1990). A new technique for determination of the possible reaction mechanism from non-isothermal thermogravimetric data. *Thermochimica acta*, 164, 285-305.
6. Melekhov, R.K., & Pokhmursky, V.I. (2003). *Konstruktivni materialy enerhetychnoho obladdannya [Construction materials of energy equipment]*. Nauk. dumka.
7. Burya, A., Yeriomina Ye., & Naberezhnaya O. (2018). Thermal resistance of graphite plastics based on aromatic polyamide. *American Journal of Analytical Chemistry*. v.9, 331-339.
8. Bhattacharyya, D., Fakirov, S. (Ed.). (2012). *Synthetic polymer-polymer composites*. Hanser Publishers.

Отримано 10.06.2024

UDC 678; 536.2.081.7

Olha Naberezhna¹, Serhii Hubarev²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Condensed State Physics, Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: o.naberezhnaya@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1302-4098>

ResearcherID: [T-2024-2019](https://orcid.org/0000-0001-8607-9394). Scopus Author ID: [57189904509](https://orcid.org/0000-0001-8607-9394)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Condensed State Physics, Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: gubarev196@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8607-9394>. Scopus Author ID: [56976192600](https://orcid.org/0000-0001-8607-9394)

THE INFLUENCE OF GRAPHITE CONTENT ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GRAPHITE PLASTICS BASED ON PHENYLON

The work is devoted to the current problem of materials science - the study of the properties of graphite plastics. After all, these materials are widely used in industry and technology, but they have their drawbacks: not too high indicators of thermophysical properties. The introduction of graphite gives plastics high chemical and thermal resistance. Heat resistance varies from 343 to 573 K, where the selected matrix plays the main role.

The paper presents the results of studies of graphitoplasts based on the aromatic polyamide Phenylon C-2. Such compositions were obtained by the method of compression pressing with different graphite content from 10 to 60 wt% in a polymer binder.

The main direction of the research was the determination of the thermal coefficient of linear expansion and the determination of thermal stability using the method of thermogravimetric analysis (TGA), as well as the determination of mechanisms and kinetic parameters using the Coates-Redfern method. It was established that the introduction of 30...60 wt. % of graphite in the polymer matrix increases the heat resistance of graphite plastics by 1.02 ... 1.22 times compared to phenylon. As for the thermal coefficient of linear expansion (TLC) of the polymer in the solid state, it depends on the temperature, gradually increasing with its growth.

The TCLR of a melt or polymer in a viscous state is always higher than in a glassy state. It was experimentally established that the thermal coefficient of linear expansion with an increase in the concentration of graphite in the polymer matrix improves by 45-48% in the case of an increase in temperature from 423 to 523 K.

Comparative analysis of the physical and mechanical properties of the obtained graphitoplasts based on phenylene with the existing analogue showed that the obtained materials based on phenylone with a filler concentration of 10-20 wt% prevail over the known structural anthebite in terms of strength of 1.14-1.48; impact viscosity 2 - 5.2; with a hardness of 1.03-1.3 times, with a simultaneous decrease in specific gravity to 25 %.

The results of the research made it possible to conduct a number of production tests of the obtained materials, which gave a positive result.

Key words: graphite; graphite plastic; phenylon; thermal coefficient of linear expansion; heat resistance; physical and mechanical properties.

Fig.: 2. Table: 3. References: 8.

**Віктор Васильович Романенко¹, Олексій Дмитрович Кагляк²,
Михайло Сергійович Блощицин³, Максим Вікторович Романенко⁴,
Єлизавета Вадимівна Євсюкова⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: m.bloshchytyn@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

⁴"ТРІЦ Республіка" ТОВ: Київ, Україна (Київ, Україна)

E-mail: romanenkomax.ua@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

⁵магістр кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: li4zka@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-4085-0985>

РОЗРОБКА СПОСОБУ ГАЗОЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МЕТАЛІВ ІЗ ПОДАЛЬШИМ ВИГЛАДУВАННЯМ ПОВЕРХНІ РІЗІВ

Наведено аналіз існуючих способів лазерного різання та представлено особливості конструктивного та технологічного вдосконалення процесу за рахунок вигладжування поверхні різів. Експериментальні дослідження, полягали в порівнянні впливу розмірів вигладжувальної кульки на якість обробленої поверхні. Встановлено, що нерівності на поверхнях різів, оброблених кульками різного діаметра, деформуються майже однаково, хоча сліди від лазерного різання скрізь залишаються. Показані результати впливу діаметра кульки на зміну мікротвердості та товщину зміцненого шару, а також величину максимального залишкового напруження на поверхні різі після вигладжування та глибину цих залишкових напружень. Розширення функціональності існуючого на ринку лазерного обладнання полягає у модернізації за рахунок встановлення пристрою для вигладжування на рухомому каретку, де розміщена лазерна фокусуєча головка. При цьому кульковий інструмент при вигладжуванні переміщувався по контуру деталі за іншою програмою, ніж при газолазерній різці, так щоб контур руху інструменту був еквідистантним до вирізаної деталі. Конструктивне розташування пристрою для вигладжування вище точки фокусування лазерного випромінювання не буде перешкоджати операціям контурного газолазерного різання.

Представлені технологічні та конструктивні рішення дозволяють знизити вартість виробу за рахунок зниження трудомісткості подальших слюсарних робіт в результаті зниження шорсткості поверхні різі та дають можливість отримати деталі з більшою міцністю їх поверхні проти втоми. Матеріальні затрати на виконання такої модернізації на кілька порядків нижчі вартості самого лазерного обладнання.

Ключові слова: лазер, технологічний процес, різка, пластична деформація, схема обробки, модернізація.

Рис.: 9. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. У сучасному виробництві надзвичайно важливо використовувати маловідходні технологічні процеси в різних галузях промисловості. Одним із ключових таких напрямків є розробка високопродуктивних і екологічно чистих методів різання матеріалів, особливо в машинобудуванні та приладобудуванні, де зустрічаються складні контури деталей із важкооброблюваних матеріалів. Такою технологією є лазерне різання металічних матеріалів. Однак у процесі такого різання зазнає значного термічного впливу край вирізаної деталі, тому досить часто поверхня крайки лазерного різі потребують додаткової обробки. Тому розробка комбінованих технологій, які включають додаткові фінішні операції покращення якості поверхні різання після основного лазерного різання є актуальною задачею.

Постановка проблеми. У ролі такої фінішної операції нами запропоновано застосувати кулькове вигладжування поверхні отриманих лазерних різів. Відомо, що в машинобудуванні вже кілька десятиліть успішно застосовується технологія вигладжування оброблюваної по-

верхні кульками, яка дозволяє отримувати ці поверхні з підвищеною міцністю, малою шорсткістю та високою стійкістю до абразивного зношування і втоми. Вигладжування кульками є екологічно безпечним методом обробки, оскільки не утворює стружки, іскор та пилу, а також дозволяє зменшити використання охолоджувальних рідин і мастильних матеріалів. При обробці складнопрофільних деталей інструмент для вигладжування рухається паралельно або перпендикулярно до слідів, залишених після попередньої обробки. Подібні сліди в нашому випадку мають вигляд борозен на поверхні після лазерного різання.

Такий підхід забезпечить покращення якості поверхні крайок різів після основного лазерного різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Лазерне різання матеріалів відрізняється від традиційних методів таких, як кисневе, плазмове або гідроабразивне різання. Лазерна технологія забезпечує вищу продуктивність, дозволяючи виконувати розрізи меншої ширини та кращої якості. Завдяки цьому зменшуються втрати матеріалу на заготівельних операціях. Крім того, лазерна різка має численні переваги, такі як висока керованість енергетичними параметрами та просторовим положенням лазерного променя, можливість висококонцентрованого фокусування, а також безконтактної дії випромінювання лазера на заготовку. Це надає гнучкість у переналаштуванні режимів різання, а також забезпечує легку автоматизацію процесу [1].

Лазерне різання здійснюється з використанням коаксіального потоку допоміжного технологічного газу, що відоме як газолазерна різка. Газ подається в зону різання одночасно зі сфокусованим лазерним променем. Він охолоджує різальну ділянку, зменшуючи тепловий вплив на крайки різі, і видаляє розплавлений шлак з різі. Якщо ж використовується кисень як технологічний газ, то енергія лазерного променя підсилюється за рахунок екзотермічного тепла, що виникає при згорянні металу в середовищі кисню [2].

При контурному лазерному різанні металевих листів особливо важлива якість різі. Спеціальні стандарти визначають термінологію, критерії оцінки якості різання, класифікацію за якістю та допустимі відхилення. Стандарт, застосований для лазерного різання матеріалів товщиною від 0,5 до 40 мм, оцінює якість різі за такими параметрами, як геометрія розрізу, якісний стан поверхні різі та характеристики змін властивостей матеріалу на крайках цього різі [3; 4].

Авторами проведені пошукові дослідження впливу додаткової операції вигладжування поверхні лазерних різів на підвищення їхніх якісних характеристик [5].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Подальше дослідження впливу параметрів кулькового вигладжування на якість лазерних різів передбачає вивчення залежності параметрів крайок різів від діаметра цих кульок. Також потрібно провести розробку варіантів конструкторського рішення для реалізації запропонованої комбінованої технології на існуючих промислових лазерних технологічних комплексах

Метою статті є визначення можливостей вдосконалення процесу лазерного різання металів з використанням комбінованого процесу лазерного різання і кулькового вигладжування поверхні лазерного різі для підвищення якості отриманих крайок різів та забезпечення підвищення міцності проти втоми при експлуатації таких деталей.

Виклад основного матеріалу. Після лазерного різання поверхня набуває певні нерівності (рис. 1). Ці нерівності виглядають як напівкруглі канавки або рифлення (борозни) і виникають внаслідок формування сфокусованого лазерного променя, швидкості різання та особливостей видалення рідкого металу з порожнини різі. При цьому поверхня різі має дві зони: верхню, що знаходиться в області входу лазерного променя в заготовку, з борознами шириною від 0,1 до 0,2 мм, та нижню – з більш грубою поверхнею, що містить відкладення затверділого рідкого металу та шлаку [6]. На нижніх крайках розрізу також може бути присутній грат, тобто задирки у вигляді затверділих напливів розрізаного металу та його оксидів [7].

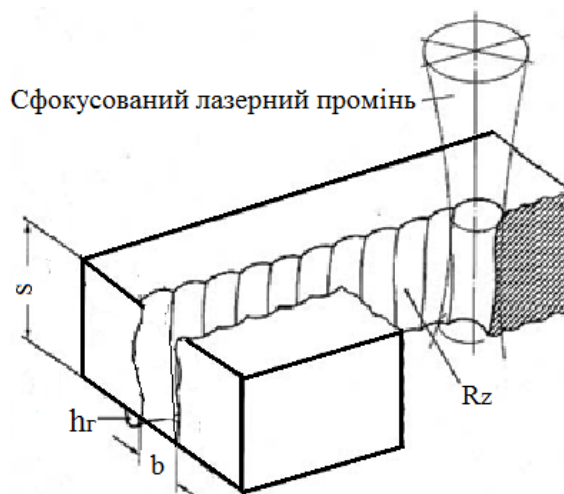


Рис. 1. Основні розмірні та якісні параметри процесу лазерного різання:
 S – товщина металу, що розрізається; b – ширина отриманого різну;
 R_z – шорсткість поверхні різну; h_r – висота грату

Подальше дослідження впливу технологічних режимів на розмірні та якісні показники процесу лазерного різання, а також розробка нових методів вдосконалення цієї технології та обладнання є важливим для широкого впровадження цієї технології у виробництво. Одним із нових методів вдосконалення процесу лазерного різання є розробка комбінованих технологій, які включають додаткові фінішні операції після основного різання лазером.

Під час обкатування гладка загартована кулька з певним зусиллям притискається до поверхні, деформуючи її. Важливу роль у досягненні потрібної якості поверхневого шару відіграє тиск, який створюється зусиллям притискання кульки до поверхні, забезпечуючи необхідну величину натягу Sa . Зусилля від такого тиску має бути достатнім для забезпечення необхідних змін поверхні різну, але надмірний тиск або велика кількість проходів інструменту можуть пошкодити поверхню і викликати відшарування окремих її ділянок. Для обробки різів у товстих заготовках використовується такий самий кульковий інструмент, але додатково застосовується поперечний рух з інтервалом подачі Sf .

Проте обкатуванням не можна виправити розмірні похибки, що виникли під час попередньої обробки заготовок, тому основна обробка (в нашому випадку контурне лазерне різання) повинно бути точним. Обкатування ж впливає тільки на мікронерівності без зміни розміру деталі. Впровадження вигладжування кульками підвищує "функціональність" обробленої поверхні, яка краще витримує контактне навантаження та має менший трибологічний знос, особливо, у присутності мастила [8; 9].

Вигладжувальні інструменти, які використовують пружні елементи для передачі зусилля, забезпечують стабільні умови обробки в будь-якій точці поверхні та дозволяють регулювати силу вигладжування. У наш час найпоширенішим способом вигладжування є метод вигладжування з пружним і жорстким закріпленням індентора. Такі індентори передбачають створення жорсткого кінематичного зв'язку між цим інструментом і оброблюваною деталлю, що здійснюється втисканням робочої частини індентора в деталь, забезпечуючи силовий вплив і пластичну деформацію матеріалу. Нині є багато пропозицій від різних виробників таких інструментів. На рис. 2 показано приклад збірного індентора [11].



Рис. 2. Приклад готового до використання збірного вигладжувача з пружним закріпленням індентора

З огляду на вищезазначений аналіз, нами були проведені експерименти та отримані результати щодо вдосконалення технології різання лазером металів із застосуванням додаткової фінішної операції кулькового вигладжування крайок різів після основного газолазерного різання. У процесі експериментів використовувався Nd:YAG-лазер моделі DY044, вироблений компанією “Rofin-Sinar” (Німеччина), з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм [11; 12]. На рис. 3 показано загальний вигляд лазерної установки та технологічний модуль з системою фокусування лазерного випромінювання і коаксальною подачею додаткового ріжучого газу, на якій проводилося лазерне різання для отримання зразків різів.

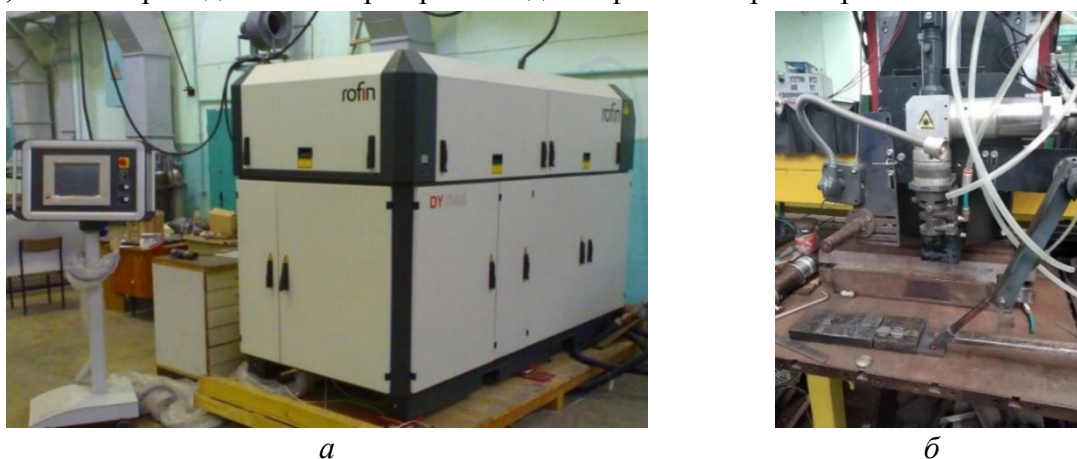


Рис. 3. Загальний вигляд Nd:YAG-лазера моделі DY044 разом з терміналом керування (а) та технологічний модуль із системою фокусування лазерного випромінювання і коаксальною подачею технологічного газу (б)

Лазерне різання в цьому експерименті проводилося при наступних параметрах: регульований діапазон потужності - 0,8...4,0 кВт; довжина хвилі випромінювання - 1,06 мкм; безперервний режим роботи лазера; розбіжність променя – менше ніж 4 мрад; модовий склад випромінювання - TEM₀₀; кругова поляризація випромінювання.

Для наших цілей було обрано оптимальну потужність лазера на рівні 1500 Вт. Об'єктив системи фокусування мав фокусну відстань - 125 мм. Діаметр сопла для подачі газу становив – 1,5 мм. Матеріалом для експериментів була сталь 45. Подачу робочого газу, яким був кисень, забезпечував різак для газолазерного різання. Умови експерименту включали використання робочого газу при тиску до 0,8 МПа. При цьому лазерний промінь спрямовувався на верхню поверхню пластини без занурення точки фокуса в глибину різі. Різання здійснювалося на зразках товщиною 4 мм при швидкості різання у 2,0 м/хв. На рис. 4 показано вигляд поверхні різі після газолазерного різання за зазначених умов обробки.

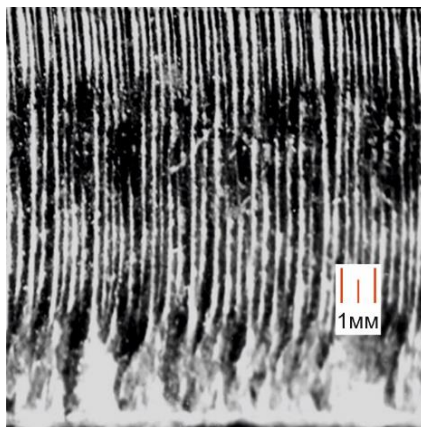


Рис. 4. Вигляд поверхні різку після лазерного різання сталі 45

Шорсткість поверхні оцінювалася шляхом вивчення різів, отриманих у результаті експериментальних досліджень, з використанням стандартного параметра шорсткості Rz (середня висота нерівностей з десяти вимірів) та середнього арифметичного відхилення профілю Ra . Вимірювання проводилися на необхідних відстанях від верхньої поверхні заготовки, щоб отримати середнє значення шорсткості поверхні з урахуванням кожної ділянки зрізу. Мікроструктуру зразків досліджували за допомогою металографічного мікроскопа. Вимірювання мікротвердості проводили за методом Віккерса на металографічних зразках, підготовлених згідно зі стандартними процедурами, використовуючи мікротвердомір з навантаженням на індентор 50 г ($HV0,05$). За результатами вимірювань мікротвердості визначали зміни твердості $HV0,05$ та товщину зміцненого шару g_h . Залишкові напруження в поверхневому шарі зразків визначалися на основі деформацій, виявлених при знятті послідовних шарів металу за допомогою хімічного травлення у 4 % розчині азотної кислоти на спеціальному стенді. Для вимірювання деформацій зразка використовувався цифровий датчик, вимірювальний наконечник якого був у контакті з поверхнею протравленого зразка. Залишкові напруження в максимальній точці позначалися як σ_{max} , а глибина стискаючо-розтягуючих напружень – як g_σ .

Раніше нами були вивчені та опубліковані залежності впливу зусилля притискання кульки до вигладжуваної поверхні Sa (сили натягу) та інтервалу поперечної подачі Sf на шорсткість Ra та Rz поверхні газолазерного різку, на зміну мікротвердості $HV0,05$ та товщини зміцненого шару g_h , а також на величину максимального від'ємного залишкового напруження σ_{max} та глибину його розташування від поверхні різку g_σ . Проведені експерименти показали, що оптимальні режими кулькового вигладжування поверхонь різів, отриманих при газолазерній різці сталі 45, мають такі значення: величина натягу – $Sa = 0,25 \dots 0,30$ мм, величина кроку поперечної подачі – $Sf = 0,15 \dots 0,20$ мм [11].

Продовження експериментального дослідження, представлене в цій статті, полягало в порівнянні впливу розмірів вигладжувальної кульки на якість обробленої поверхні. Для цього порівнювалися поверхні, оброблені кульками різних діаметрів – 6 мм, 10 мм та 15 мм. Встановлено, що нерівності на поверхнях різів, оброблених кульками різного діаметра, деформуються майже однаково, хоча сліди від лазерного різання скрізь залишаються. Наприклад, при використанні кульки діаметром 6 мм спостерігалось значне зменшення різниць у нерівностях між вхідною та вихідною зонами, але вершини нерівностей залишалися лише частково згладженими. Кулька діаметром 10 мм забезпечувала більш суттєве сплюснювання ліній борозен, хоча різниця в шорсткості між зонами входу та виходу лазерного променя все ще була помітна.

Порівняння поверхонь, оброблених кульками діаметрами 6 мм та 15 мм, показало, що максимальна висота профілю поверхні, отриманої за допомогою 6-міліметрової кульки, приблизно на 30 % менша, ніж висота при використанні 15-міліметрової кульки (рис. 5). Поверхня, оброблена кулькою діаметром 6 мм, мала більш інтенсивне згладження між виступами та западинами порівняно з поверхнею, обробленою кулькою діаметром 15 мм. Найбільша висота поверхні після обробки кулькою діаметром 6 мм зменшилася більш ніж на 60 % у порівнянні зі значенням після різання лазером, тоді як обробка кулькою діаметром 15 мм знизила цей показник менш ніж на 50 %.

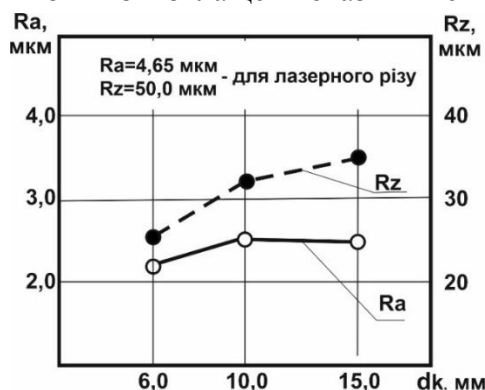


Рис. 5. Вплив діаметра кульки d_k на шорсткість R_a та R_z після газолазерної різки з подальшим кульковим вигладжуванням для $S_a = 0,25$ мм та $S_f = 0,20$ мм

На рис. 6 показано результати впливу діаметра кульки d_k на зміну мікротвердості $HV_{0,05}$ та товщину зміцненого шару g_h . Найбільше збільшення мікротвердості спостерігалось для кульок діаметром 6 мм, тоді як максимальна товщина зміцненого шару відповідала кулькам діаметром 15 мм. Зміни в мікротвердості $HV_{0,05}$ та товщині g_h зумовлені збільшенням радіуса кривизни кульок із більшим діаметром. Однак слід зазначити, що в розглянутому діапазоні діаметрів кульок зміни $HV_{0,05}$ та g_h були незначними. Дослідження показали, що максимальне збільшення мікротвердості для зразків зі сталі 45 становило менше за 20 %.

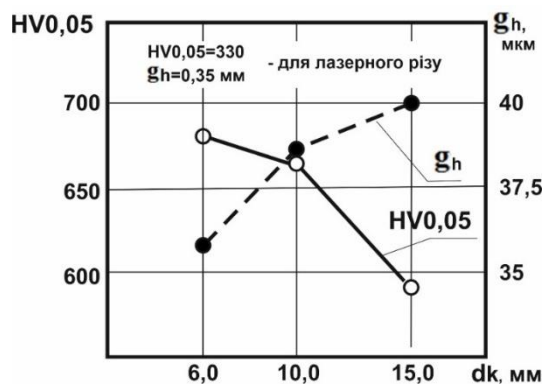


Рис. 6. Вплив діаметра кульки d_k на зміну мікротвердості $HV_{0,05}$ та товщини зміцненого шару g_h для зразків після лазерного різання та з кульковим вигладжуванням при $S_a = 0,25$ мм та $S_f = 0,20$ мм

Експериментальні дослідження також показали, що зі збільшенням діаметра кульки абсолютна величина максимальної залишкової напруги σ_{max} зменшується. Це пояснюється збільшенням радіуса кривизни кульки та зниженням тиску на одиницю площі. Одночасно з цим збільшується глибина проникнення стискаючих залишкових напружень g_h (рис. 7). При використанні кульки діаметром 15 мм глибина проникнення стискаючих залишкових напружень була приблизно на 22 % більшою, а величина цих напружень на ~ 17 % меншою, ніж для кульки діаметром 6 мм.

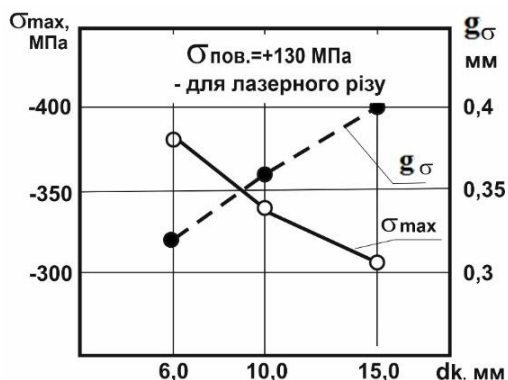


Рис. 7. Вплив діаметра кульки d_k на величину максимального залишкового напруження σ_{max} та глибину залишкових напружень g_{σ} на поверхню після різання лазером та з подальшим кульковим вигладжуванням для $S_a = 0,25$ мм та $S_f = 0,20$ мм

На основі проведених досліджень щодо впливу діаметра кульок на вигладжування поверхонь лазерних різів у сталі 45 можна зробити наступні висновки. Кульки діаметром 6 мм забезпечують найменшу шорсткість поверхні після вигладжування, збільшення мікротвердості поверхні різів та незначне зростання (до 20 %) від'ємних залишкових напружень, що позитивно впливає на зносостійкість деталей з обробленими в такий спосіб крайками різів. Однак не до кінця зрозуміло, чи є незначне зменшення глибини зміцненого шару та залишкових напружень для кульок меншого діаметра позитивним фактором. Для отримання точної відповіді на це питання необхідні додаткові дослідження. Тим не менше, уже зрозуміло, що для процесу лазерного різання середньовуглецевих сталей з додатковим фінішним вигладжуванням поверхні різів найкраще використовувати збірні вигладжувачі (рис. 2) з діаметром кульки 5-7 мм. Поверхня газолазерного різів, оброблена таким інструментом, виглядає, як показано на рис. 8.

Для реалізації комбінованої технології лазерної різки з подальшим вигладжуванням поверхні різання кульками ми розробили два варіанти конструкторського рішення для використання на існуючих промислових лазерних технологічних комплексах (ЛТК).

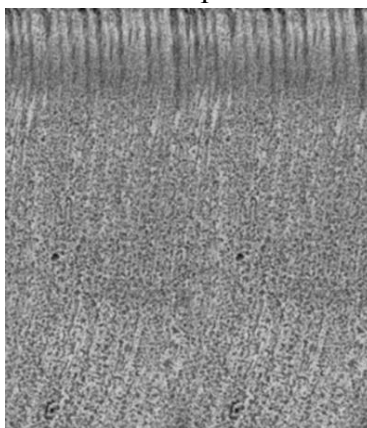


Рис. 8. Вигляд лазерного різів після кулькового вигладжування на підібраних режимах обробки

Суть першого варіанту обробки полягає в наступному. На ЛТК, що складається з лазерного випромінювача, системи передачі лазерного випромінювання в зону різки, системи подачі допоміжного газу та координатного столу, проводиться лазерне різання за традиційною технологією. Програма для переміщення координатного столу визначає початок різки з заданої вихідної точки на заготовці. Після цього відбувається вирізання деталі за запрограмованим у лазерному верстаті контуром (рис. 9, а).

Після завершення лазерного різання вирізана деталь знову встановлюється на координатний стіл на додаткову опору таким чином, щоб деталь була на деякій відстані від поверхні столу. Це необхідно для забезпечення вільного переміщення вигладжувального інструмента. При цьому деталь надійно закріплюється притискачем із зусиллям F .

Далі в ту ж вихідну точку контуру вирізаної деталі замість лазерного різачка підводиться розроблений нами пристрій для вигладжування з вертикально встановленим кульковим інструментом (рис. 9, б).

У конструкції вигладжувального інструменту був передбачений вал для встановлення на нього кульки з отвором і канал для подачі мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) у зону обробки. Кулька мала обертатися на валу вільно, але без люфту.

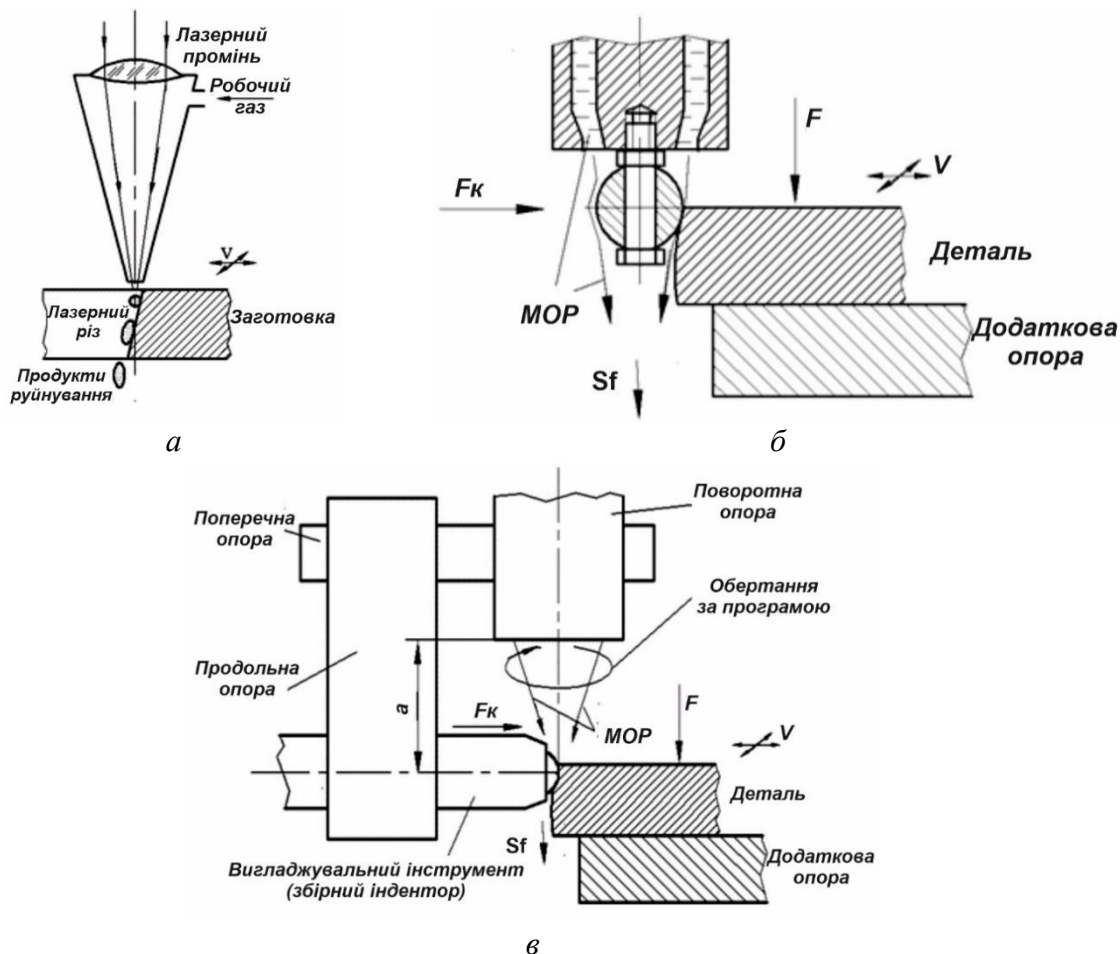


Рис. 9. Комбінований метод лазерного різання металів з подальшим кульковим вигладжуванням поверхні зрізів включає: етап лазерної різки (а), етап вигладжування лазерного різку кулькою з отвором (б) та етап вигладжування різку за допомогою промислового збірного індентора (в)

Вигладжувальний пристрій встановлювався біля верхнього краю деталі і притискався до поверхні лазерного різку з необхідним зусиллям вигладжування F_k . Для цього в конструкції може бути передбаченим динамометр, який регулював би зусилля притискування у заданому діапазоні як у початковій точці контуру, так і в процесі вигладжування по всьому контуру деталі.

У подальшому кульковий інструмент переміщувався по контуру деталі за іншою програмою, ніж при газолазерній різці, так щоб контур руху інструменту був еквідистантним до вирізаної деталі. Еквідистанта руху повинна враховувати радіус кульки і величину деформації поверхні деталі під час вигладжування.

Після повного обходу контуру деталі кульковий інструмент, який знову знаходиться у початковій точці, переміщується вглиб різку на величину покрокового інтервалу S_f , і обхід деталі знову повторюється. Цикл потрібно повторювати стільки разів, скільки проходів необхідно для повного вигладжування різку по всій його глибині. Важливо відзначити, що така схема обробки дозволяє вигладжувати як зовнішній, так і внутрішній контур вирізаної деталі.

Оскільки кулька з отвором у центрі не є дуже міцною конструкцією, ми розробили ще одну схему обробки з використанням промислового збірного індентора (див. рис. 2). Конструкція для реалізації цієї схеми включала поворотну опору з можливістю обертання навколо своєї осі, поперечну опору, закріплену перпендикулярно до поворотної опори, поздовжню опору, закріплену паралельно поворотній опорі, і вигладжувальний пристрій (збірний індентор), закріплений у поздовжній опорі (рис. 9, в). Збірний індентор був встановлений так, щоб край його кульки збігався з віссю поворотної опори.

Надалі, як і в першій схемі обробки, вигладжувальний пристрій встановлювався біля верхнього краю деталі та притискався до поверхні лазерного різку з необхідним зусиллям вигладжування F_k . Відмінності другої схеми полягали також і в застосуванні іншої програми переміщення кулькового інструменту по контуру деталі. У цьому випадку інструмент переміщувався за тією ж програмою, що і при лазерному різанні деталі, але з додатковим обертанням поворотної опори, щоб вигладжувальний пристрій завжди залишався перпендикулярним до контуру вирізаної деталі. Важливо відзначити, що відстань між торцем поворотної опори та віссю вигладжувального інструменту a повинна забезпечувати обробку деталей заданої товщини.

Усі інші елементи конструкції та послідовність обробки залишалися такими ж, як і в першій схемі. Варто також зауважити, що запропонована друга схема обробки підходить лише для вигладжування зовнішніх контурів деталей.

Отже, модернізація лазерних технологічних комплексів для виконання комбінованої операції лазерного різання металів з подальшим вигладжуванням поверхні різку може полягати в наступному:

1. Пристрій для вигладжування доцільніше встановлювати на рухому каретку, де розміщена лазерна фокусуєча головка, жорстко зв'язавши їх між собою. Оскільки конструктивно пристрій для вигладжування розташований вище точки фокусування лазерного випромінювання, він не буде перешкоджати виконанню операції контурної газолазерної різки.

2. У програмі для виконання вигладжування за першою схемою треба передбачати додаткову програму переміщення вигладжувального інструмента іншу, ніж для контуру газолазерної різки, так щоб контур руху інструменту був еквідистантним до вирізаної деталі.

3. У програмі ж зі стандартним промисловим вигладжувачем потрібно передбачити додаткове обертання поворотної опори, щоб вигладжувальний пристрій завжди залишався перпендикулярним до нормалі контуру деталі, що обробляється.

Висновки. У підсумку, запропонований нами метод лазерного різання з подальшим кульковим вигладжуванням поверхні різів дозволяє підвищити експлуатаційні якості деталей, вирізаних на промислових ЛТК за розробленою нами комбінованою технологією.

Крім того, запропонована модернізація лазерного технологічного комплексу дозволила розширити його функціональні можливості за рахунок застосування операції вигладжування поверхні вирізаної лазером деталі. Це, у свою чергу, дало можливість отримати деталі з більш "функціональною" боковою поверхнею порівняно з деталлю, вирізаною тільки лазером. Така деталь має більш згладжену та зміцнену бокову поверхню, що забезпечує підвищення міцності деталей проти втоми у 2...3 рази в порівнянні з деталями, отриманими тільки лазерним різанням.

Враховуючи, що матеріальні затрати на виконання модернізації для використання, розробленої комбінованої технології при випуску промислових ЛТК на кілька порядків нижчі вартості самого ЛТК, а показники якості отриманих в такий спосіб деталей багаторазово компенсують ці затрати, то широке впровадження такої технології при виготовленні сучасних ЛТК має широкі перспективи.

Список використаних джерел

1. Пупань, Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 109 с.
2. Коваленко, В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. – Київ : Техніка, 1987. – 112 с.
3. Petring, D. Some answers to frequently asked questions and open issues of laser beam cutting / D. Petring, F. Schneider, N. Wolf // Proceedings of the 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2012). – Pp. 43-48.
4. Wandera, C. Laser power requirement for cutting thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality / C. Wandera, V. Kujanpaa, A. Salminen // Journal of Engineering Manufacture. – 2011. – № 225. – Pp. 651-661.
5. Вдосконалення процесу лазерної різки за рахунок кулькового вигладжування поверхні різів [Електронний ресурс] / В. В. Романенко, М. С. Блощицин, М. В. Романенко, А. С. Кушнеренко // Mechanics and Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 8. – № 2 (101). – Pp. 112-123. – Режим доступу: <https://journal.mmi.kpi.ua/article/view/299709>.
6. Modeling on surface cut quality of CO₂ laser cutting for Austenitic Stainless-steel sheet / A. Parthiban, C. Dhanasekaran, S. Sivaganesan, S. Sathish // Mater. Today Proc. – 2020. – Vol. 21. – Pp. 823–827.
7. Романенко, В. В. Підвищення якості газолазерної різки металевих матеріалів за рахунок усунення грату на кромках різів при використанні в поліграфічній промисловості / В. В. Романенко // Технологія і техніка друкарства : збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 4(38). – С. 90–94.
8. Кирилович, В. А. Основи технологій обробки поверхонь деталей машин : підручник / В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, В. А. Яновський; за ред. В. А. Кириловича. – Житомир : Видавець О. О. Євенок, 2017. – 266 с.
9. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel / R. Avilés, J. Albizuri, A. Rodríguez, L.N. López de Lacalle // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 55. – P. 230-244.
10. Grochala, D. Stress in the surface layer of objects burnished after milling / D. Grochala, S. Berczynski, Z. Grzadzziel // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 72(9-12). – Pp. 1655–1663. DOI:10.1007/s00170-014-5775-x.
11. Прогнозирование остаточных напряжений и напряжений течения по топографии поверхности, созданной с помощью технологии лазерной резки / М. Харничарова, Дж. Валичек, А. Окснер, Р. Грзнарик, М. Кушнерова, Дж. Нойгебауэр, Д. Козак // Лазерная технология. – 2013. – № 52. – С. 21-29.
12. Застосування лазерного термоцикування для підвищення якості плазмових зносостійких покриттів [Електронний ресурс] / Л. Ф. Головка, О. Д. Кагльак, В. В. Романенко, М. С. Блощицин // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022 – Vol. 6 – № 3. – Pp. 328-341. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55461>.

References

1. Pupan, L.I. (2020). *Lazerni tekhnolohii u mashynobuduvanni [Laser technologies in mechanical engineering]*. NTU «KhPI».
2. Kovalenko, V.S., Romanenko, V.V., Oleshchuk, L.M. (1987). *Malootkhodnye protsessy rezky лучом лазера [Small-flow processes of laser beam cutting]*. Tekhnika.
3. Petring, D., Schneider, F., Wolf, N. Some answers to frequently asked questions and open issues of laser beam cutting. Proceedings of the 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2012) (pp. 43-48).
4. Wandera, C., Kujanpaa, V., Salminen, A. (2011). Laser power requirement for cutting thicksection steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225, 651–661.

5. Romanenko, V., Bloschchysyn, M., Romanenko, M., Kushnerenko, A. (2024). Vdoskonalennia protsesu lazernoi rizky za rakhunok kulkovoho vyhladzhuvannia poverkhni riziv [Enhancement of laser cutting by using ball smoothing of cut surface]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 8(2(101)). [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.2\(101\).299709](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).299709).

6. Parthiban, A., Dhanasekaran, C., Sivaganesan, S., Sathish, S. (2020). Modeling on surface cut quality of CO₂ laser cutting for Austenitic Stainless-steel sheet. *Mater. Today Proc.*, 21, 823–827.

7. Romanenko, V.V. (2012). Pidvyshchennia yakosti hazolazernoi rizky metalevykh materialiv za rakhunok usunenennia hratu na kromkakh riziv pry vykorystanni v polihrafichnii promyslovosti [Improving the quality of gas laser cutting of metal materials due to the elimination of burr on the edges of cuts when used in the printing industry]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva – Printing technology and technology*, 4(38), 90–94.

8. Kyrylovych, V.A., Melnychuk, P.P., Yanovskyi, V.A. (2017). *Osnovy tekhnolohii obrobky poverkhon detalei mashyn [Fundamentals of surface treatment technologies of machine parts]*. Vyd. O.O. Yevenok.

9. Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A., López de Lacalle, L.N. (2013). Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue*, 55, 230–244.

10. Grochała, D., Berczynski, S., Grządziel, Z. (2014). Stress in the surface layer of objects burnished after milling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 72, 1655–1663.

11. Kharnycharova, M., Valychek, Dzh., Oksner, A., Hrnaryk, R., Kushnerova, M., Noihebauer, Dzh., Kozak, D. (2013). Prohnozirovanie ostatochnykh napriazhenii i napriazhenii techeniia po topografii poverkhnosti, sozdannoi s pomoshchiu tekhnologii lazernoi rezki [Prediction of ultimate stress and stress flow on the topography of the surface created with the help of laser cutting technology]. *Lazernaia tekhnolohiia – Laser technology*, 52, 21–29.

12. Golovko, L., Kaglyak, O., Romanenko, V., Bloschchysyn, M. (2022). Application of laser thermocycling to improve the quality of plasma wear-resistant coatings [Application of Laser Thermocycling to Improve the Quality of Plasma Wear-Resistant Coatings]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(3), 328–341. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55461>.

Отримано 03.06.2024

UDC 621.375.826:621

**Victor Romanenko¹, Oleksii Kaglyak², Mykhaylo Bloschchysyn³,
Maksym Romanenko⁴, Yelyzaveta Yeysiukova⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1918-7090>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: m.bloschchysyn@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3688-7948>

⁴“TRC RESPUBLIKA” LLC (Kyiv, Ukraine)

E-mail: romanenkmax.ua@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

⁵ Master of of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: li4zka@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-4085-0985>

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR GAS LASER CUTTING OF METALS WITH SUBSEQUENT FINISHING OF CUT SURFACES

An analysis of the existing methods of laser cutting is given and the features of constructive and manufacturability improvement of the process due to smoothing the surface of the cuts are presented. Experimental studies consisted in comparing the effect of the size of the smoothing ball on the quality of the treated surface. It was established that the irregularities on the surfaces of the cuts processed by balls of different diameters are deformed almost equally, although traces of laser cutting remain everywhere. The results of the impact of the diameter of the ball on the change in microhardness and the thickness of the hardened layer, as well as the value of the maximum residual stress on the surface of the cut after smoothing and the depth of these residual stresses are shown.

Expanding the functionality of existing laser equipment on the market consists in modernization by installing a smoothing device on a moving carriage, where the laser focusing head is placed. At the same time, for the implementation of the proposed combined technology of laser cutting with subsequent smoothing of the cutting surface, two variants of the design solution to the given task are proposed. The implementation of the first variant of processing provided for the presence of a shaft in the design of the smoothing tool for installing balls with a hole on it and a channel for supplying lubricating and cooling liquid to the processing zone. The ball tool during smoothing moved along the contour of the part according to a different program than during gas laser cutting, so that the contour of the movement of the tool was equidistant to the cut part. The structural location of the smoothing device above the focus point of the laser radiation allowed not to interfere with contour gas laser cutting operations. The second scheme included a rotary support with the ability to rotate around its axis, a transverse support fixed perpendicular to the rotary support, a longitudinal support fixed parallel to the rotary support, and an industrial smoothing device (collectible indenter) fixed in the longitudinal support. The assembled indenter was installed so that the edge of its ball coincided with the axis of the rotary support.

The presented technological and constructive solutions allow to reduce the cost of the product by reducing the labor intensity of further metalwork as a result of reducing the roughness of the cut surface and make it possible to obtain parts with greater strength of their surface against fatigue. The material costs of such modernization are several orders of magnitude lower than the cost of the laser equipment itself.

Keywords: laser; technological process; thermal conductivity; cutting; plastic deformation; diagram of treatment.

Fig.: 9. References: 12.

Оксана Петрівна Гапонова¹, Наталія В'ячеславівна Тарельник²

¹доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>. **Researcher ID:** 56938828500

²кандидат економічних наук, доцент кафедри проектування технічних систем

Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: natasha-tarelnik@ukr.net. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-6304-6925>. **Researcher ID:** 57195836961

ОЦІНКА ЖАРОСТІЙКОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛЯХ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Проведені дослідження з визначення жаростійкості покриттів на сталях, отриманих методом електроіскрового легування (ЕІЛ). Випробування показали, що під час високотемпературних експериментів вони не поступаються дифузійним покриттям. Дослідження першої серії зразків зі сталі 20 після алітування методом ЕІЛ показали, що зміни їх маси при високотемпературній витримці близькі за значенням до покриттів, отриманих в розплаві алюмінію. Металографічним аналізом визначено, що ЕІЛ покриття захищають сталь від окиснення. Дослідження другої і третьої серій зразків (сталей 06Х12НЗДЛ і 12Х18Н10Т) після ЕІЛ показав, що найкращі показники жаростійкості мають покриття після алітування і двошарові покриття Al і ніхром. Розроблені покриття рекомендовані як жаростійкі.

Ключові слова: електроіскрове легування; жаростійкість; покриття; алітування.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Підвищення робочих температур деталей енергетичного обладнання і газових турбін у поєднанні зі зниженням якості використовуваного палива привело до широкого використання технологій модифікації поверхні з метою забезпечення збільшення терміну служби. Відомі методи синтезу дифузійних алюмовмісних покриттів [1]. Проте технології хіміко-термічного оброблення мають значні недоліки, такі як значна тривалість процесу насичення, громіздке обладнання, нагрів всієї деталі, енергоємність, не екологічність тощо. Ці недоліки сприяли розвитку нових методів модифікації поверхні, що засновані на використанні концентрованих потоків енергії та речовини. Найбільш затребуваним і простим методом з точки зору промислової реалізації є електроіскрове легування (ЕІЛ). Є низка вагомих публікацій, у яких відображені фізична сутність ЕІЛ, використовувані матеріали, особливості формування структури модифікованого шару [2-4] тощо. Однак у більшості випадків, метод ЕІЛ застосовується для формування твердих зносостійких і м'яких припрацювальних покриттів, тобто з особливими триботехнічними властивостями, або для відновлення зношених поверхонь. Питання використання електроіскрових захисних корозійностійких чи/або жаростійких покриттів є відкритим і потребує подальшого дослідження.

Постановка проблеми. Покриття на основі Cr, Al і Si, як окремо, так і в комбінації, відомі давно і використовують їх для підвищення стійкості матеріалів до високотемпературної корозії, включаючи високотемпературне окиснення і гарячу корозію, ерозію, ерозійно-корозійну взаємодію, знос і термічну деградацію. Покриття з високим вмістом алюмінію є найбільш широко використовуваними. Значна частина ранніх розробок цих покриттів була пов'язана з авіаційною промисловістю. На відміну від сплавів на основі нікелю, алюмінієві покриття на залізних системах, таких як жароміцні аустенітні нержавіючі сталі, є набагато менш вивченими.

Насьогодні достатньо велика кількість динамічного обладнання, такого як турбонасосні і турбокомпресорні агрегати та турбіни, працюють у надважких умовах, підвищених температурах, тисках, опроміненні тощо, від матеріалу яких вимагається стійкість до високотемпературної корозії. Основним матеріалом для їх виготовлення є сталі, жароміцні нержавіючі сталі аустенітного і перехідних класів, завдяки їхній чудовій високотемпературній міцності та технологічності при кімнатній температурі.

Таким чином, останнім часом алітування сплавів на основі заліза отримало новий імпульс [5], як засіб покращення високотемпературної корозійної стійкості матеріалів, які можуть бути використані в багатьох галузях енергетики. Хоча алюмінієві покриття достатньо широко використовуються у промисловості, поточний дослідницький інтерес до захисних покриттів зосереджений на вивченні покриттів і вдосконаленні методів їх синтезу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [6], що з метою надання залізовуглецевим сплавам підвищення окалиностійкості, опору атмосферній корозії і ряду інших властивостей застосовують алітування. Крім того, покриття на основі алюмінію характеризуються високою температурою плавлення, низькою щільністю, високим модулем пружності, жароміцністю, стійкістю до окислення і займання [7].

Корозія алюмінію та його сплавів була широко вивчена в різних середовищах: атмосферна корозія, кислоти, хлориди тощо. Чистий алюміній (99 % або вище) має дуже хорошу стійкість до атмосферної корозії та підходить для захисного анодування [8]. Оскільки алюміній є анодом до сталі, він захищатиме її від гальванічних впливів у морській воді [9].

Для отримання алюмінієвих покриттів на сталевих підкладках використовується велика кількість методів. Тонкі покриття на основі Al зазвичай виготовляються методами PVD, IBAD або методами напилення [10-12]. Дифузійні методи використовуються для отримання більш товстих покриттів (до кількох сотень мкм). Такі методи використовувалися декількома авторами для різних цілей, серед яких захист від корозії в солоних або морських середовищах [13]. Крім того, авторами [14] показано, що корозійна стійкість алітованих покриттів краща, якщо товщина покриттів збільшується. Однак методи хіміко-термічного оброблення мають значні недоліки, що обмежують їх використання в промисловості.

Алюмінієві покриття на сталевих підкладках мають великий інтерес через утворення сполук Fe-Al, які виявляють дуже цінні властивості: хороші механічні властивості, низьку щільність і доступність сировини з хорошою стійкістю до корозії та окислення [15; 16]. Покриття на основі інтерметалевих сполук Fe-Al є перспективними для використання в середовищах із високими температурами через їхню високу жаростійкість і низьку собівартість.

Отримання доброго металевого контакту між сталлю і алюмінієвими сплавами ускладняється великою спорідненістю алюмінію до кисню і значною міцністю окису алюмінію (Al_2O_3), про що свідчить теплота утворення цієї сполуки, що дорівнює 400 ккал/моль. Однак основною перешкодою є хімічна взаємодія цих металів, що приводить до необоротного утворення інтерметалевих сполук по лінії переходу. Тому вивчення впливу режимних параметрів поверхневої обробки на якість покриття становить значний інтерес.

Перспективним методом поверхневого модифікування є електроіскрове легування (ЕІЛ), що дозволяє отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними і трибологічними властивостями. Перевагою ЕІЛ є екологічна безпека процесу, висока міцність зчеплення легованого шару і матеріалу основи, можливість нанесення на зміцнювальну поверхню будь-яких струмопровідних матеріалів, низька енергоємність процесу, простота виконання технологічної операції [17]. Електроіскрове легування, володіючи широкими можливостями формування в поверхнях певної структури, фазового та хімічного складу, дозволяє поліпшити їх експлуатаційні властивості.

Процес ЕІЛ екологічно чистий і безпечний, тому що здійснюється при напрузі 20-100 В і тривалості імпульсних розрядів 10^{-6} – 10^{-3} с. При цьому товщина формованих шарів з твердих сплавів становить $\sim 0,01$ – $0,15$ мм, а з пластичних і більш легкоплавких матеріалів шар покриття може досягати $\geq 0,3$ – $0,5$ мм. У зоні розряду електроерозія, масоперенесення матеріалу електродів (у паровій, рідкій і твердій фазах), кристалізація та інші явища протікають у дуже нерівноважних умовах, що сприяють утворенню структур

з дрібним зерном, високою щільністю дислокацій, з особливим напружено-деформованим станом, певними фізико-хімічними властивостями. Змінюючи параметри і умови ЕІЛ, можна регулювати мікрометалургійні процеси в цій зоні, проводити спрямований синтез тугоплавких і інших хімічних сполук і формувати складні композиційні покриття з інтерметалідів, карбідів, нітридів, оксидів як за рахунок матеріалів електродів, так і елементів міжелектродного середовища.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри незаперечні переваги електроіскрового легування, використання деталей, оброблених іскровим імпульсом, у промисловості недостатньо широке. Застосування цього способу в машинобудуванні стримується відсутністю довідкового матеріалу щодо оптимізації режимів оброблення, вибору електродного матеріалу й визначенні галузі раціональної експлуатації оброблених поверхонь. У процесі ЕІЛ бере участь легуючий електрод (анод), що обробляє поверхню деталі (катод) і міжелектродне середовище, варіюючи якими стає можливим цілеспрямоване керування формуванням експлуатаційних властивостей.

Метою статті є оцінка жаростійкості електроіскрових покриттів, що містять алюміній, отриманих на сталях.

Методика досліджень. Як основу використовували зразки зі сталей 20, 12Х18Н10Т і 06Х12НЗДЛ розміром 15×15×8 мм, на які наносили алюмінієві покриття методом ЕІЛ на установці з ручним вібратором моделі «Елітрон-52А». В якості електродів використовували стрижні з алюмінієвого дроту марки СвА99 – діаметром 4 мм, нікелю – Ø 3 мм, ніхром (80 % Ni + 20 % Cr) – Ø 3,5 мм, хрому – Ø 3 мм.

Легування здійснювалося на різних режимах, кожному з яких відповідає своя енергія розряду і продуктивність – площа сформованого покриття в одиницю часу (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду [18]

Енергія розряду (W_p), Дж	0,05	0,13	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, $см^2 / хв$	0,4-0,6	0,7-0,9	1,0-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

У роботі проведені дослідження з оцінки жаростійкості алітованих покриттів, отриманих ЕІЛ. Досліджувалися три серії зразків:

– перша серія – зразки зі сталі 20, ЕІЛ шари отримували за два проходи, спочатку з енергією розряду $W_p = 2,6$ Дж і продуктивністю $1,8$ $см^2 / хв$, а потім, з $W_p = 1,3$ Дж і продуктивністю $0,8$ $см^2 / хв$. Як показали дослідження, після такої обробки формуються якісні покриття (суцільність 100 %) з низькою шорсткістю [18];

– друга серія – зразки зі сталі 12Х18Н10Т. Одношарові покриття Al, Ni, Cr і ніхром (80 % Ni + 20 % Cr) виконували у три проходи ЕІЛ, поступово зменшуючи енергію розряду: перший прохід при $W_p = 0,52$ Дж, другий при $0,13$ Дж і третій при $0,05$ Дж, забезпечуючи максимальну суцільність покриття (100 %) і мінімальну шорсткість на рівні $Ra = 0,7-0,9$ мкм. Двошарові покриття ЕІЛ Al + ЕІЛ Ni виконували у послідовності: ЕІЛ Al при $W_p = 0,52$ Дж, наступний шар ЕІЛ Ni при $W_p = 0,13$ Дж. Двошарові покриття ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr) виконували у послідовності: ЕІЛ Al при $W_p = 0,52$ Дж, другий шар ЕІЛ ніхром (80%Ni+20%Cr) при $W_p = 0,13$ Дж. Для зменшення шорсткості поверхні після формування двошарових покриттів виконували ЕІЛ алюмінієвим електродом при енергії розряду $0,05$ Дж до шорсткості $Ra = 0,7-0,9$ мкм.

– третя серія – зразки зі сталі 06Х12НЗДЛ. ЕІЛ виконували у тій самій послідовності, використовуючи подібні режими, що і на сталі 12Х18Н10Т.

Випробування на жаростійкість першої серії зразків проводили відповідно до стандарту (ГОСТ 6130-71. Метали. Методи визначення жаростійкості), який визначає методи дослідження жаростійкості в умовах впливу газових середовищ і повітря при високих

температурах. Жаростійкість визначалася після витримки зразків у печі протягом 50 годин при постійній температурі 980°C, ваговим методом по зміні маси зразків. При випробуванні на жаростійкість забезпечували рівномірне омивання поверхні зразків газовим середовищем, зразки розміщували в печі в керамічних тиглях. Перед випробуванням зразки були просушені і зважені на аналітичних вагах з точністю до $\pm 0,1$ мг. Поверхня зразків знежирювалася. Також вимірювалася площа їх поверхні. Лінійні розміри визначали мікрометром. Після цього зразки в тиглях з окису алюмінію поміщали в піч. Кожен зразок знаходився в окремому тиглі. Нагрівання зразків проводилося в електричній печі опору (температура контролювалася термопарою). Жаростійкість сплаву визначали по зміні ваги зразка після кожних 3-7 годин витримки в печі, віднесеного до його площі поверхні. Збільшення маси зразка визначалося за різницею результатів зважування холодного зразка до і після витримки в печі.

Оцінювання жаростійкості проводили за збільшенням маси зразка за певний період часу на одиницю площі K , г/м²:

$$K = \frac{\Delta m}{S},$$

де Δm – втрата маси зразка при випробуванні, г;

S – загальна площа поверхні зразка, м².

Випробування на жаростійкість другої і третьої серії зразків проводили шляхом визначення зміни маси зразків до і після випробування, розміри яких були однакові для всіх методів обробки (15×15×8 мм). Таким чином, визначали абсолютне значення зміни мас зразків. Жаростійкість визначалася після витримки зразків у печі протягом 10 годин при постійній температурі 950 °С. Перед випробуванням зразки були просушені і зважені на аналітичних вагах з точністю до $\pm 0,1$ мг. Поверхня зразків знежирювалася. Після цього зразки в тиглях з окису алюмінію поміщали в піч. Кожен зразок знаходився в окремому тиглі. Нагрівання зразків проводилося в електричній печі опору (температура контролювалася термопарою). В якості показника жаростійкості використовували абсолютне значення зміни мас зразків до і після випробування. Зміни маси зразка контролювали кожних 10 годин витримки в печі. Збільшення маси зразка визначалося за різницею результатів зважування холодного зразка до і після витримки в печі.

Для порівняння показників жаростійкості, зразки із досліджуваних сталей піддавали класичному алітуванню – у розплаві алюмінію відповідно до [19], і без покриття.

Шорсткість поверхні зразків досліджували на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр». Металографічний аналіз покриттів після випробування на жаростійкість виконували за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-7, до і після травлення. Суцільність нанесених покриттів визначали металографічним методом.

Результати дослідження. У роботі [18] авторами досліджений структурний стан алітованих покриттів на конструкційних сталях 20 і 40. Металографічним, локальним мікрорентгеноспектральним і дюрOMETричним аналізами виявлено, що на поверхні формується «білий шар» – шар, що не піддається травленню звичайними реактивами, він насичений алюмінієм і має підвищену твердість близько 7400 МПа, залежно від енергії розряду. Під білим шаром розташовується дифузійна зона, у якій вміст алюмінію поступово зменшується до хімічного складу основи. Перевага ЕІЛ покриттів у тому, що вони мають добрий адгезійний зв'язок з основним матеріалом, вони не відшаровуються, а міцно зчеплені з підкладкою. Як показали дослідження, алітований шар має товщину 30-70 мкм на сталі 20, і 30-130 мкм на сталі 40. Важливим параметром структури є суцільність покриття. При енергіях розряду 2,6 Дж і більше отримані покриття із суцільністю 100 %.

Аналіз діаграми стану залізо-алюмінії показує [16], що в ЕІЛ-шарі ймовірно формування інтерметалідів, що підтверджується високою твердістю покриття. Також не можна виключати формування нітридів і оксидів, оскільки електроіскрове легування здійснювалося на повітрі. Дуже ймовірні невеликі обсяги чистого матеріалу електрода. У роботі [20] авторами визначений фазовий склад алітованих покриттів на сталях 20 і 40. При енергіях розряду, що приводять до формування суцільного покриття, формується фаза з моноклінною структурою – $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ (12 просторова група) і осаджується чистий алюміній (225 просторова група). Очевидно, поява інтерметалідних фаз і сприяє збільшенню твердості покриття зі збільшенням енергії розряду, а також, очевидно і жаростійкості.

Як було визначено, алітовані покриття забезпечують залізобуглецевим сплавам підвищену жаростійкість. Випробування зразків зі сталі 20, проведені на повітрі при температурі 980 °С протягом 50 годин показали, що ЕІЛ покриття характеризуються високою жаростійкістю, навіть дещо вищою, ніж після класичної технології алітування в розплаві, що дає можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах (рис. 1).

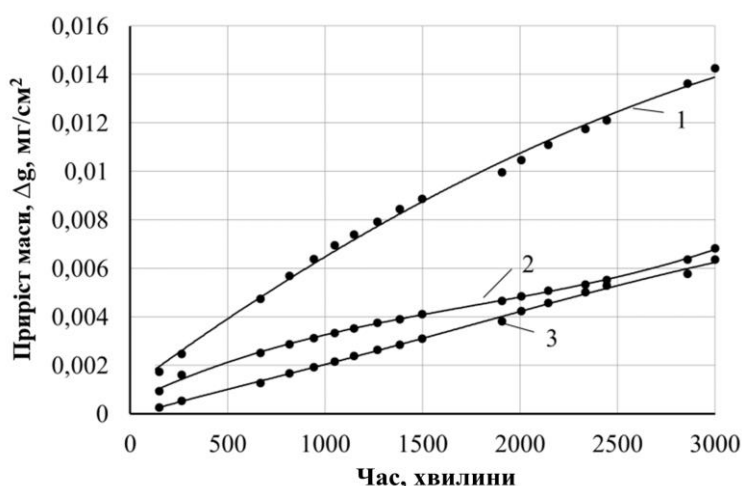


Рис. 1. Жаростійкість алітованих покриттів на сталі 20 (випробування на повітрі при 980 °С, 50 год):

1 – без покриття; 2 – алітування методом ЕІЛ; 3 – алітування в розплаві алюмінію
Джерело: розроблено авторами.

Проведені металографічні дослідження характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість. На всіх зразках спостерігається наявність оксидних включень, особливо інтенсивно окислились зразки без захисного покриття (рис. 2, а). Поверхневий шар після рідинного алітування крім дифузійної зони містить на поверхні зону з алюмінію, що залишився після припинення процесу алітування. Після випробування на жаростійкість (рис. 2, б) спостерігається окиснення металу під покриттям, про що свідчить наявність окисного прошарку, який відділяє поверхневий шар і основу. Очевидно, подібний характер руйнування покриття і, отже, окиснення основного металу призводить до збільшення маси зразків при високотемпературних випробуваннях.

На зразках з алітованим покриттям, отриманим методом ЕІЛ, спостерігається зменшення товщини «білого» шару (рис. 2, в), отже при високотемпературних випробуваннях відбувається руйнування поверхнього шару, і зміна маси пов'язана з фізико-хімічними процесами, що відбуваються переважно в поверхневому шарі, а не в основному металі. Поверхневий алітований шар, що складається з інтерметалідів заліза і алюмінію, а також чистого алюмінію надійно захищає сталь від окиснення під час випробування на жаростійкість.

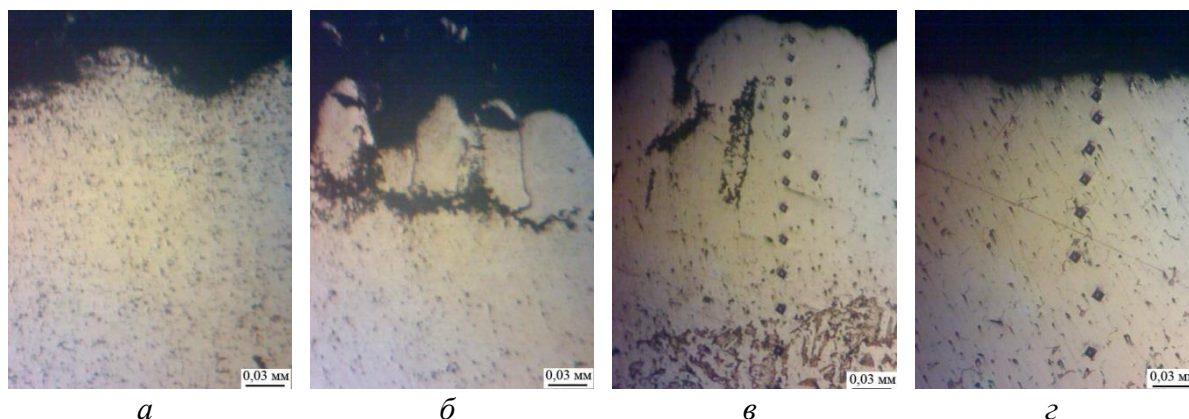


Рис. 2. Мікроструктури алітованих покриттів на сталі 20 після випробування на жаростійкість (випробування на повітрі при 980 °С, 50 год):
 а – без покриття (нетравлений шліф); б – алітування в розплаві алюмінію (нетравлений шліф); в – алітування в розплаві алюмінію (після травлення в 3-5 % розчині HNO_3); г – алітування методом ЕІЛ (після травлення у 3-5 % розчині HNO_3)
 Джерело: розроблено авторами.

Визначені абсолютні значення зміни мас зразків сталей 06X12H3ДЛ і 12X18H10Т після випробування на жаростійкість при температурі 950 °С впродовж 100 годин (рис. 3). Так само, як і на сталі 20 визначено, що електроіскрові покриття на рівні дифузійних захищають сталь від окиснення. Варто відмітити, що найкращі показники мають покриття, що містять алюміній – ЕІЛ Al, тобто алітування методом ЕІЛ, і ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr), тобто багатошарове ЕІЛ покриття, що нанесене послідовно шар алюмінію і наступний шар із ніхрому. Очевидно, що створювані в покритті під час ЕІЛ фази забезпечують надійний захист сталі від високотемпературного окиснення. Також слід враховувати якість покриттів. Режими обробки обрані таким чином, щоб забезпечувати максимальну суцільність покриття у поєднанні з мінімальною шорсткістю. Порівняно зі зразками без покриття алюмінійвмісні ЕІЛ покриття мають на більше ніж 90 % менший приріст маси, що свідчить про ефективний захист поверхні сталі від високотемпературного окиснення. Отже, розроблені покриття можна рекомендувати як жаростійкі.

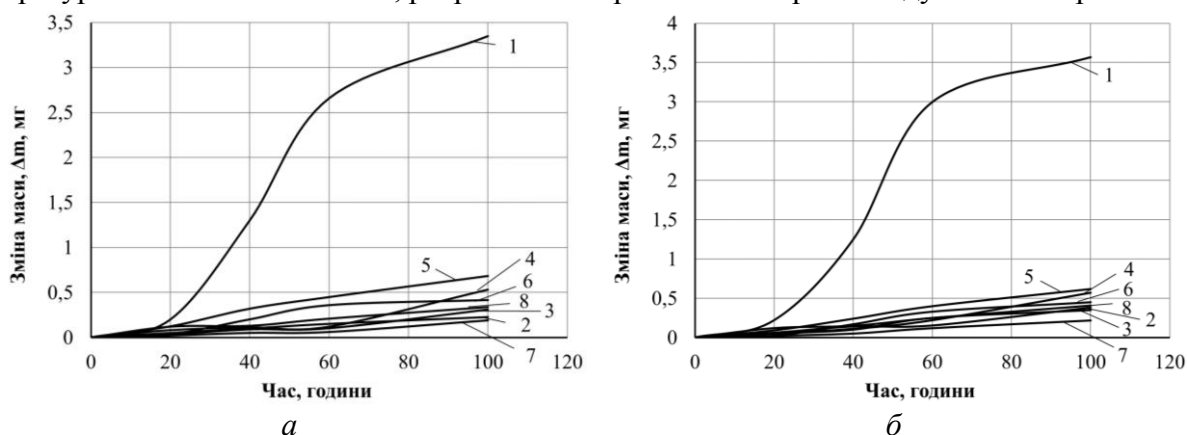


Рис. 3. Зміна маси зразків зі сталі 06X12H3ДЛ (а) і сталі 12X18H10Т (б) під час випробування на жаростійкість

при температурі 950 °С впродовж 100 годин. Покриття на зразках:
 1 – без покриття; 2 – традиційне в розплаві Al; 3 – ЕІЛ Al; 4 – ЕІЛ Ni;
 5 – ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr); 6 – ЕІЛ Al + ЕІЛ Ni;
 7 – ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr); 8 – ЕІЛ Cr

Джерело: розроблено авторами.

Висновок. Дослідження жаростійкості електроіскрових алітованих покриттів на сталях показали, що під час високотемпературних випробувань вони не поступаються дифузійним. Дослідження першої серії зразків – сталі 20 після алітування методом ЕІЛ, що забезпечують 100 % суцільність показали, що втрата маси складає близько 0,007 мг/см² під час випробування при 980 °С впродовж 50 годин і близько за значенням до покриттів, отриманих в розплаві алюмінію. Проведений металографічний аналіз характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість показав, що після високотемпературної витримки основний метал окиснюється, про що свідчить наявність оксидів в поверхневому шарі. Особливо інтенсивно окиснюються зразки без захисного покриття. Алітовані покриття, отримані в розплаві алюмінію і методом ЕІЛ, захищають від окиснення основний метал, про що свідчить менший вміст оксидів в при поверхневому шарі основного металу. Результати дослідження дають можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах.

Дослідження другої і третьої серій зразків (сталей 06X12H3ДЛ і 12X18H10Т) після поверхневої обробки показав, що абсолютні значення зміни мас зразків сталей з покриттями, що містять алюміній – ЕІЛ Al, тобто алітування методом ЕІЛ, і ЕІЛ Al + ЕІЛ ніхром (80 % Ni + 20 % Cr), тобто з багат шаровим ЕІЛ покриттям, після випробування на жаростійкість при температурі 950 °С впродовж 100 годин, на більше ніж 90 % менші, порівняно зі зразками без покриття, що свідчить про ефективний захист поверхні сталі від високотемпературного окиснення. Отже, розроблені покриття можна рекомендувати як жаростійкі.

Результати частково отримано в рамках науково-дослідного проекту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. № 0124U000539, Сумський державний університет).

Список використаних джерел

1. Bahadur, A. Aluminum Coatings for Steel / A. Bahadur // Materials and Manufacturing Processes. – 1996. – Vol. 11(2). – Pp. 225–232. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426919608947476>.
2. Tarel'nyk, V. B. Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application / V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – Pp. 147–156.
3. Antoszewski B. Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method / B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T.I. Zhylenko, I. Konoplianchenko // Materials. - 2021. – No. 14. – P. 739. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14040739>.
4. Barile, C. Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review / Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, G. Renna // Coatings. – 2022. – No 12. – P. 1536. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>.
5. Tarel'nyk, V. Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying / V. Tarel'nyk, O. Haponova, N. Tarel'nyk., O. Myslyvchenko // Uspekhi Fiziki Metallov. – 2023. – Vol. 24, No. 2. – Pp. 282–318. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.282>.
6. Борисова, А. Л. Дифузійні жаростійкі покриття для нержавіючої та вуглецевої сталей / А. Л. Борисова, Н. І Капорік, Т. В. Цимбаліста, М. А. Васильківська, М. А. Васильковская // Автоматическая сварка. – 2019. – № 10. – С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.10.04>.
7. Brochu, M. Heard development of metastable solidification structures using the electrospark deposition process / M. Brochu, J.G. Portillo, J. Milligan and D.W. Heard // The Open Surface Science Journal. – 2011. – No 3. – Pp. 105–114.

8. Bailey, J.C. Aluminum and Aluminum Alloys / J. C. Bailey, F. C. Porter, A. W. Pearson, R. A. Jarman // Corrosion: Metal/Environment Reactions / Edited by L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein. – Third edition. – Butterworth Heinemann, 1994.
9. Wood, R.J.K. Erosion–corrosion of candidate HVOF aluminium-based marine coatings / R. J. K. Wood, A. J. Speyer // Wear. – 2004. – Vol. 256 (5). – Pp. 545-556. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00564-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00564-7).
10. Zhang Bo Electrochemical corrosion behaviour of microcrystalline aluminium in acidic solutions / Bo Zhang, Ying Li, Fuhui Wang // Corrosion Science. – 2007. – Vol. 49 (5). – Pp. 2071-2082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.11.006>.
11. Charrier C. Aluminium and Ti/Al multilayer PVD coatings for enhanced corrosion resistance / C. Charrier, P. Jacquot, E. Denisse, J. P. Millet, H. Mazille // Surface and Coatings Technology. – 1997. – Vol. 90 (1–2). – Pp. 29-34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)03080-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)03080-0).
12. Mehmood, M. The effect of heat treatment on the corrosion behavior of sputter-deposited aluminum–chromium alloys / M. Mehmood, E. Akiyama, H. Habazaki, A. Kawashima, K. Asami, K. Hashimoto // Corrosion Science. – 1998. – Vol. 41 (3). – Pp. 477-499. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00130-9).
13. Fatma Ahnia. Evaluation of aluminum coatings in simulated marine environment / Fatma Ahnia, Boualem Demri // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 220. – Pp. 232-236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.011>.
14. Han Min-Su Effects of thickness of Al thermal spray coating for STS 304 / Min-Su Han, Yong-Bin Woo, Seok-Cheol Ko, Young-Jae Jeong, Seok-Ki Jang, Seong-Jong Kim // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2009. – Vol. 19 (4). – Pp. 925-929. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60379-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60379-9).
15. Deevi, S. C. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications / S. C. Deevi, V. K. Sikka // Intermetallics. – 1996. – Vol. 4 (5). – Pp. 357-375. DOI: [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9).
16. Matysik, P. Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System – Microstructures and Mechanical Properties / P. Matysik, S. Józwiak, T. Czujko // Materials. – 2015. – № 8(3). – Pp. 914-931. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma8030914>.
17. Wang, J. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review / J. Wang, M. Zhang, S. Dai, L. Zhu // Coatings. – 2023. – № 13. – Pp. 1473-1497. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>.
18. Kirik, G. V. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, B. Antoszewski // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2018. – Vol. 56. – Pp. 688–696. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>.
19. Минкевич, А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: монография / А. Н. Минкевич. – Москва : Машиностроение, 1965. – 493 с.
20. Tarelnyk, V. B. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, O. M. Myslyvchenko // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2019. – Vol. 41. – № 10. – Pp. 1377–1394. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1377>.

References

1. Bahadur, A. (1996). Aluminum Coatings for Steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 11(2), 225–232. <https://doi.org/10.1080/10426919608947476>.
2. Tarelnyk, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Y. G., Martsinkovskii, V. S., Belous, A.V., Konoplyanchenko, E. V., and Gaponova, O. P. (2018). Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 147–156.
3. Antoszewski, B., Gaponova, O. P., Tarelnyk, V. B., Myslyvchenko, O.M., Kurp, P., Zhylenko, T.I., and Konoplianchenko, I. (2021). Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method. *Materials*, 14, 739.

4. Barile, C., Casavola, C., Pappaletta, G., and Renna, G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*, 12, 1536.
5. Tarelynyk, V., Haponova, O., Tarelynyk, N., and Myslyvchenko O. (2023). Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying. *Uspekhi Fiziki Metallov*, 24(2), 282-318.
6. Borisova A.L., Kaporik N.I., Tsymbalistaya T.V., and Vasilkovskaya M.A. (2019). Diffuzionnyye zharostoykiye pokrytiya dlya nerzhavayushchey i uglerodisty staley [Diffusion heat-resistant coatings for stainless and carbon steels]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, (10), 28-35.
7. Brochu, M., Portillo, J.G., Milligan, J. and Heard D.W. (2011). Heard development of metastable solidification structures using the electrospark deposition process. *The Open Surface Science Journal*, 3, 105-114.
8. Bailey J.C., Porter, F.C., Pearson, A.W., & Jarman, R.A. (1994). Aluminum and Aluminum Alloys, in *Corrosion: Metal / Environment Reactions*, third edition, Edited by L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein, Butterworth Heinemann.
9. Wood, R.J.K., and Speyer, A.J. (2004). Erosion–corrosion of candidate HVOF aluminium-based marine coatings. *Wear*, 256(5), 545-556.
10. Zhang Bo, Li Ying, and Wang Fuhui (2007). Electrochemical corrosion behaviour of microcrystalline aluminium in acidic solutions. *Corrosion Science*, 49(5), 2071-2082.
11. Charrier C., Jacquot, P., Denisse, E., Millet, J.P., and Mazille H. (1997). Aluminium and Ti/Al multilayer PVD coatings for enhanced corrosion resistance. *Surface and Coatings Technology*, 90(1–2), 29-34.
12. Mehmood, M., Akiyama, E., Habazaki, H., Kawashima, A., Asami, K., and Hashimoto, K. (1998). The effect of heat treatment on the corrosion behavior of sputter-deposited aluminum–chromium alloys. *Corrosion Science*, 41(3), 477-499.
13. Fatma Ahnia and Boualem Demri (2013). Evaluation of aluminum coatings in simulated marine environment. *Surface and Coatings Technology*, 220, 232-236.
14. Min-Su Han, Yong-Bin Woo, Seok-Cheol Ko, Young-Jae Jeong, Seok-Ki Jang, and Seong-Jong Kim (2009). Effects of thickness of Al thermal spray coating for STS 304. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(4), 925-929.
15. Deevi, S.C., and Sikka, V.K. (1996). Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4(5), 357-375.
16. Matysik, P., Józwiak, S., and Czujko, T. (2015). Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System – Microstructures and Mechanical Properties. *Materials*, 8(3), 914-931.
17. Wang, J., Zhang M., Dai, S., and Zhu, L. (2023). Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*, 13, 1473-1497.
18. Kirik, G.V., Gaponova, O. P., Tarelynyk, V. B., Myslyvchenko, O. M., & Antoszewski, B. (2018). Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 56, 688–696.
19. Minkevich, A. N. (1965). *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]*. Mashinostroyeniye.
20. Tarelynyk V. B., Gaponova, O. P., and Myslyvchenko O. M. (2019). Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41(10), 1377–1394.

Отримано 13.06.2024

Oksana Haponova¹, Natalia Tarelnik²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>. **Researcher ID:** 56938828500

²Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Technical Systems Design Department
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

E-mail: natasha-tarelnik@ukr.net. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-6304-6925>. **Researcher ID:** 57195836961

EVALUATION OF THE HEAT RESISTANCE OF ALUMINUM COATINGS ON STEELS PRODUCED BY ELECTROSPARK ALLOYING

Increasing operating temperatures of power plant and gas turbine components, combined with the deteriorating quality of the fuels used, have led to the widespread use of surface modification technologies to ensure extended service life. Cr, Al and Si based coatings, all individually and in combination, are used to increase the resistance of materials to high temperature corrosion, including high temperature oxidation and hot corrosion, erosion, erosion-corrosion interaction, wear and thermal degradation. Coatings with a high aluminium content are the most widely used. The most popular and simplest method of surface modification in terms of industrial implementation is electrospark alloying (ESA). In most cases, the ESA method is used to form hard wear-resistant and soft running-in coatings or to restore worn surfaces. The use of electrospark protective corrosion and/or heat-resistant coatings is an open issue and requires further research.

The aim of this paper is to evaluate the heat resistance of aluminium-containing electrospark coatings deposited on steels. Steel 20, 12X18H10T and 06X12H3ДЛ were used as substrates. Aluminium coatings were formed on Steel 20 using the ESA method, and single-layer coatings of Al, Ni, Cr and Nichrome (80%Ni+20%Cr) and two-layer ESA Al + ESA Ni, ESA Al + ESA Nichrome coatings were formed on 12X18H10T and 06X12H3ДЛ steels using modes that deny 100% continuity and roughness $R_a = 0.7 - 0.9 \mu\text{m}$. The study of the heat resistance of electrospark aluminised coatings on steel 20 showed that they were not inferior to diffusion coatings in high temperature tests. It was found that the mass loss during a test at 980°C for 50 hours was about 0.007 mg/cm², which is close to that of coatings obtained in aluminium melts. Metallographic analysis of the oxidation pattern of samples of steel 20 after the heat resistance test showed that the substrate is oxidised after exposure to high temperatures, as evidenced by the presence of oxides in the surface layer. Samples without a protective coating are particularly susceptible to oxidation. Coatings applied in the aluminium melt and by the ESA method protect the substrate from oxidation, as evidenced by the lower oxide content in the surface layer of the substrate. The study of the heat resistance of samples of 12X18H10T and 06X12H3ДЛ steels after ESA showed that the absolute values of the mass changes in samples of steels with aluminium coatings – ESA Al, i.e. alitisation by ESA, and ESA Al + ESA Nichrome (80%Ni+20%Cr), i.e. with a two-layer ESA coating, after a heat resistance test at 950 °C for 100 hours, are more than 90% lower than those of uncoated samples, which indicates an effective protection of the steel surface against high temperature oxidation. Therefore, the developed coatings can be recommended as heat resistant.

Keywords: electrospark alloying; heat resistance; coating; alitisation.

Fig.: 3. **Table:** 1. **References:** 20.